



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VYUŽITÍ JASOVÉHO ANALYZÁTORU PRO KVANTIFIKACI UMĚLÉHO SVĚTLA V NOČNÍM PROSTŘEDÍ

USE OF LUMINANCE ANALYSER FOR THE QUANTIFICATION OF ARTIFICIAL LIGHT AT NIGHT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Novák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Filip Novák

ID: 195681

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Využití jasového analyzátoru pro kvantifikaci umělého světla v nočním prostředí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V práci se bude řešit adaptace jasového analyzátoru na vyjádření míry umělého světla v nočním prostředí. Cílem je vytvořit měřicí metodu, která by dostatečně objektivně stanovila míru světla unikajícího do okolního prostředí ve srovnání s přirozeným pozadím. Nabízí se využití jasového analyzátoru a to buď s přímým měřením jasu, a nebo s úpravou spektrální citlivosti.

Doporučená osnova práce

1. rešerše významných studií posuzující negativní vliv umělého světla v nočním prostředí,
2. vyjádření míry unikajícího světla pomocí měření jasu,
3. práce s jasovým analyzátozem, vyhodnocení jasových map,
4. návrh metodiky na měření umělého světla,
5. experimentální měření a vyhodnocení různých světelných aplikací.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího diplomové práce

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá rušivým osvětlením a jeho měřením, především pomocí jasových analyzátorů. Zejména zde je položen potřebný teoretický základ pro návrh měřicí metodiky rušivého osvětlení, respektive závoje jas oblohy. Toto obnáší především dělení rušivého osvětlení a jeho projevů, popis dopadů rušivého osvětlení na životní prostředí, vybrané organismy a na lidský organismus. Taktéž jsou zde popsány biologické mechanismy lidského těla, které jsou světlem jako takovým ovlivněny. Pozornost je věnována i veřejnému osvětlení, jeho členění a metodám omezování rušivého osvětlení, jakožto i metodám měření jasů a jasovým analyzátorům. V neposlední řadě je také provedeno měření noční oblohy pomocí jasového analyzátoru LumiDISP a následné vyhodnocení dat pomocí navržené metody.

Klíčová slova

rušivé osvětlení, světelné znečištění, jasový analyzátor, jasoměr, LumiDISP, veřejné osvětlení, nepříznivé vlivy rušivého světla,

Abstract

This diploma thesis deals with obtrusive light and its measurement, especially with the help of luminance analyzers. In particular, the necessary theoretical basis for the design of a measuring methodology for obtrusive light or veil brightness of the sky is laid here. This mainly includes the division of obtrusive light and its manifestations, a description of the effects of obtrusive light on the environment, selected organisms and the human body. Also described herein are the biological mechanisms of the human body that are affected by light as such. Attention is also paid to streetlights, its classification and methods of reducing obtrusive light, as well as methods of measuring brightness and brightness analyzers. Last but not least, the night sky is also measured using the LumiDISP luminance analyzer and subsequent data are evaluated using the proposed method.

Keywords

obtrusive light, light pollution, stray light, luminance analyzer, luminance meter, LumiDISP, streetlight, adverse effects of light pollution

Bibliografická citace:

NOVÁK, Filip. Využití jasového analyzátoru pro kvantifikaci umělého světla v nočním prostředí [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134909>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Petr Baxant.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Využití jasového analyzátoru pro posouzení vlivu osvětlení na životní prostředí“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 24. května 2021

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Petru Baxantovi, Ph.D. za příkladnou a účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 24. května 2021

.....
podpis autora

Obsah

1.	Úvod	13
2.	Rušivé osvětlení a světelné znečištění	14
2.1	Druhy rušivého osvětlení	14
2.1.1	Závojevý jas oblohy	15
2.1.2	Rušivé oslnění	16
2.1.3	Světelný přesah	17
2.1.4	Podíl horního světla ULR	17
2.2	Možnosti eliminace rušivého osvětlení	18
3.	Světlem ovlivnitelné soustavy lidského těla	22
3.1	Lidské oko a zraková soustava	22
3.2	Chronotypy a cirkadiánní rytmy	24
3.3	Negativní dopady rušivého osvětlení na endokrinní soustavu	26
3.4	Karcinogenní vlastnosti rušivého světla	27
4.	Vliv rušivého osvětlení na životní prostředí	28
4.1	Rostliny	28
4.2	Hmyz	29
4.3	Ryby	30
4.4	Obojživelníci	30
4.5	Želvy	31
4.6	Ptáci	32
4.7	Létaví savci	32
5.	Venkovní osvětlovací systémy	33
5.1	Druhy a využití venkovních osvětlovacích soustav	33
5.2	Regulace a spínání veřejného osvětlení	37
6.	Jas a jeho měření	38
6.1	Konvenční způsoby měření jasu	39
6.1.1	Přímé měření jasu	39
6.1.2	Nepřímé měření jasu	40
6.2	Jasové analyzátory	40
6.2.1	Jasový analyzátor LDA-LumiDISP	43
7.	Měření jasu noční oblohy v městské aglomeraci	44

7.1	Postup měření a základního zpracování dat	44
7.2	Analýza a vyhodnocení naměřených dat.....	50
8.	Závěr	64

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

ALAN	...	artificial light at night
CCD	...	charge-coupled device
CIE	...	Mezinárodní komise pro osvětlování
CMOS	...	complementary metal-oxide-semiconductor
HPS	...	vysokotlaká sodíková výbojka
LED	...	svítivá dioda
LPS	...	nízkotlaká sodíková výbojka
RO	...	rušivé osvětlení
SAD	...	sezónní deprese
VO	...	veřejné osvětlení
WHO	...	Světová zdravotnická organizace

Symboly:

$DLOR$...	poměrná část světelného toku vyzařovaného do dolního poloprostoru	[-]
CCT	...	náhradní teplota chromatičnosti	[K]
E	...	osvětlenost	[lx]
I	...	svítivost	[cd]
φ	...	světelný tok	[lm]
L	...	jas	[cdm ⁻²]
L_N	...	přirozený jas oblohy	[cdm ⁻²]
L_\varnothing	...	průměrný jas zenitu	[cdm ⁻²]
k_{ZJ}	...	koeficient závojevého jasu	[-]
ρ	...	činitel odrazivosti	[-]
S	...	plocha	[m ²]
ULR	...	podíl světla do horního poloprostoru	[lm]
$ULOR$...	poměrná část světelného toku vyzařovaného přímo do horního poloprostoru	[-]
u	...	činitel využití světelného toku instalace	[-]
Ω	...	prostorový úhel	[sr]

Seznam obrázků

Obr. 2-1 Znázornění různých forem rušivého světla [3].....	14
Obr. 2-2 Příklad výrazného závojového jasu oblohy [4]	15
Obr. 2-3: Rozdělení světelného toku do poloprostorů. [3]	17
Obr. 2-4 Eliminace přímého vyzařování svítidla do horního poloprostoru. [12]	19
Obr. 2-5 Nevhodný a vhodný způsob osvětlování svislé plochy. [12]	19
Obr. 2-6 Nevhodný a vhodný způsob osvětlování horizontální plochy. [12].....	20
Obr. 2-7 Svítidla se symetrickým a asymetrickým vyzařováním. [12]	20
Obr. 2-8 Srovnání konstrukcí svítidel VO. [13, upraveno].....	21
Obr. 3-1: Schéma lidského oka. [29]	22
Obr. 3-2: Spektrální citlivosti čípků. [32]	23
Obr. 3-3: Fázově posunutá sekrece melatoninu u ranních a večerních chronotypů. [36, upraveno]	25
Obr. 4-1 Vliv lampy VO na opadávání listů javoru. [43]	28
Obr. 4-2 Hmyz přitahovaný a dezorientovaný lampou [8]	29
Obr. 4-3 Stejně staří pulci druhu <i>Xenopus laevis</i> . Jedinec A vyrůstal v prostředí s přirozenou fotoperiodou, jedinec B v prostředí s rušivým osvětlením. [10].....	30
Obr. 6-1 Ilustrace veličiny jas. [3]	38
Obr. 6-2 Schéma fyzikálního jasoměru. [18].....	39
Obr. 6-3 Relativní citlivost lidského oka a CCD snímače. [20, upraveno]	40
Obr. 6-4 Jedno z možných uspořádání jasového analyzátoru. [19, upraveno]	41
Obr. 6-5 Zachycený snímek jasovým analyzátozem ve skutečných barvách a jemu příslušící jasová mapa. [25]	42
Obr. 7-1 Prostředí programu LumiDISP.....	45
Obr. 7-2 Snímky noční oblohy s různým expozičním časem.	46
Obr. 7-3 Analýza expozice sekvence snímků.....	47
Obr. 7-4 Snímky sekvence, převedené do jasových map.	48
Obr. 7-5 Výsledný HDR snímek snímané scény.	49
Obr. 7-6 Zkoumaný snímek Měsíce (Autor: Petr Baxant).....	51
Obr. 7-7 Jasová mapa Měsíce v rozsahu 0–3000 cdm ⁻²	52
Obr. 7-8 Jasová mapa Měsíce v rozsahu 0–1 cdm ⁻²	52

Obr. 7-9 Jasová mapa Měsíce se zkušebním řezem.....	53
Obr. 7-10 Jasy na průběhu řezu z blízkosti Měsíce. Osa Y v cdm^{-2}	53
Obr. 7-11 Jasová mapa s vlivem mlhy.....	54
Obr. 7-12 Průběh jasů na řezu oblastí mlhy. Osa Y v cdm^{-2}	55
Obr. 7-13 Analyzovaný snímek zenitu 1.	55
Obr. 7-14 Analyzovaný snímek zenitu 2.	56
Obr. 7-15 Analyzovaný snímek zenitu 3.	57
Obr. 7-16 Záběr na horizont v Brně.....	58
Obr. 7-17 Jasová mapa horizontu.	58
Obr. 7-18 Průběh jasu směrem od horizontu. Osa Y v cdm^{-2}	59
Obr. 7-19 Pořízený snímek prostranství před nádražím.	60
Obr. 7-20 Jasová mapa prostranství před nádražím s vyznačenými detektory.....	61
Obr. 7-21 Histogram pro lampu VO „A“.....	62
Obr. 7-22 Histogram pro lampu VO „B“.....	62

Seznam tabulek

Tabulka 2-1: Stupnice činitele oslnění UGR [28].	16
Tabulka 5-1 Rozdělení svítidel podle jejich rozložení světelného toku [14].	34
Tabulka 5-2 Rozdělení prostředí do zón pro astronomická pozorování [14].	35
Tabulka 5-3 Porovnání světelných zdrojů vhodných pro veřejné osvětlení [15].	36

1. ÚVOD

Problematika rušivého osvětlení se v poslední době dostává stále více a více do popředí veřejného i odborného zájmu, a to hned z několika důvodů, které vyplývají z nemalého množství rovin, které tento problém nějakým způsobem ovlivňuje. Je odhadováno, že přibližně 20 % povrchu Země je ovlivněno rušivým osvětlením (Cinzano et al., 2001), tedy se jedná o problém vsutku globální.

První rovinou, kde tento problém figuruje, je rovina ekonomická. Ta část světelného toku, která v konečném důsledku spadá do kategorie rušivého osvětlení, byla také vyzářena umělým světelným zdrojem, a tedy byla na její výrobu spotřebována elektrická energie. Optimalizaci svítidel a osvětlovacích soustav lze tento podíl minimalizovat, a tak dosáhnout lepší účinnosti osvětlovací soustavy, a tedy i nižších nákladů na provoz.

Druhou rovinou problematiky rušivého osvětlení je jeho vliv na životní prostředí. Četné publikace, například [7] a [10] ukazují, že rušivé osvětlení ovlivňuje velké množství živých organismů, pochopitelně z drtivé části negativně. Jeho eliminací tedy můžeme zmírnit dopad civilizace na životní prostředí.

Další rovinou je pochopitelně dopad rušivého osvětlení na lidské zdraví a psychiku. I v tomto oboru neustále probíhá další a další výzkum, zabývající se vlivem, které tento negativní projev osvětlování exteriérů má. Dopad rušivého osvětlení na lidský organismus je rozhodně nezanedbatelný, ať se již jedná o poruchy spánku, deprese, či zvýšené riziko rakoviny.

Dalšími rovinami této problematiky by mohla být například rovina astronomická nebo estetická, a i v takovém případě by se jednalo o nekompletní výčet.

Z výše uvedeného je tedy patrné, že rušivé osvětlení je něco, čemu je potřebné se v nejvyšší možné míře vyvarovat. Ovšem aby bylo možné nějakému jevu zabránit, je třeba jej analyzovat, kvantifikovat, a měřit. Zde ovšem narážíme na problém, jelikož do dnešního dne nebyla ustanovena žádná univerzální metrika měření rušivého osvětlení, která by se v oboru stala standardem. Jasové analyzátory se k řešení problému měření rušivého osvětlení přímo nabízí, jelikož díky nim jsme schopni krom jiného určit jas libovolného zaznamenaného bodu a s těmito hodnotami dále pracovat, ať už jde o měření oslnění či stupeň závažnosti závojového jasu oblohy. A právě toto by měl být cíl této práce, osvětlit použití jasových analyzátorů pro analýzu rušivého osvětlení a pokusit se stanovit potřebnou měřicí metodiku ke zhodnocení těchto výsledků.

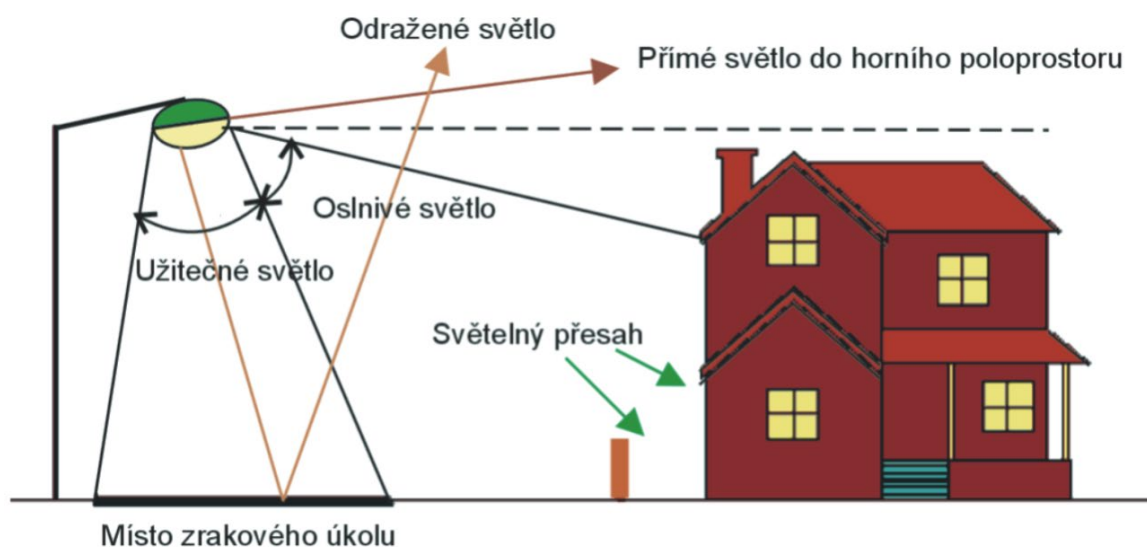
Po teoretické rešerši studií, které dokumentují negativní vliv rušivého osvětlení na jednotlivé soustavy lidského těla následuje druhá část, která zahrnuje podobnou rešerši, která se ovšem týká životního prostředí. Zde jsou popsány vlivy rušivého osvětlení na rozličné třídy a řády živých organismů, jakožto i na rostliny. V následující části diplomové práce jsou rozebrány technické aspekty měření jasu a je zde popsána technologie jasových analyzátorů. V poslední části práce se nachází popis samotného měření jasu jasovým analyzátozem a to včetně návrhu metodiky vyhodnocování stupně závojového jasu noční oblohy.

2. RUŠIVÉ OSVĚTLENÍ A SVĚTELNÉ ZNEČIŠTĚNÍ

V první řadě je žádoucí ujasnit terminologii. V populárně naučné i odborné literatuře se často vyskytuje jak termín rušivé osvětlení, tak světelné znečištění. Pojem „světelné znečištění“ vznikl překladem z anglického originálu „light pollution“ a jako takový je poměrně zavádějící a nepřesný, jelikož světlo jako takové neznečišťuje, „pouze“ ruší. Mnohem vhodnější je použít frázi „rušivé osvětlení“ či „rušivé světlo“, které [1] definuje jako „Všeobecný pojem označující celkové nepříznivé vlivy osvětlení ve venkovních prostorech. Viditelné záření umělých zdrojů světla, které negativně ovlivňuje přírodní stav nočního prostředí, zrakové funkce, způsobuje nepohodu a není účelně využíváno.“ Z tohoto důvodu bude i v této práci nadále používán pojem rušivé osvětlení.

2.1 Druhy rušivého osvětlení

Sokanský et al. v [3] definuje rušivé osvětlení celkem čtyřmi pojmy, které zde budou následně popsány. Tyto formy rušivého osvětlení jsou závojevý jas oblohy, oslnivé světlo, světelný přesah a podíl horního světla ULR – viz Obr 2-1.



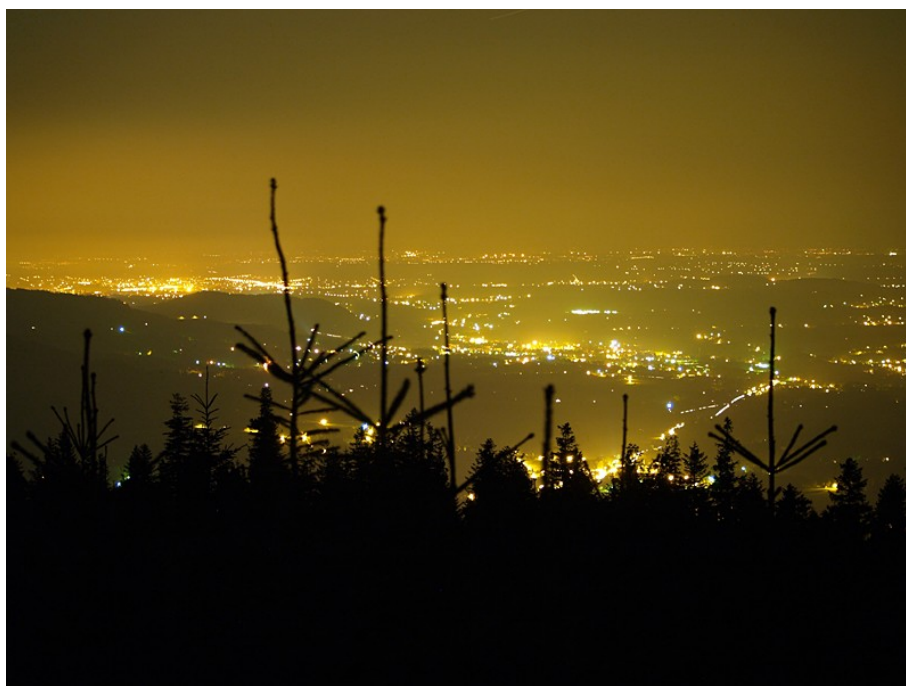
Obr. 2-1 Znázornění různých forem rušivého světla [3]

Různí autoři používají různé dělení rušivého osvětlení, nicméně obvykle se tyto kategorie liší jen v drobných nuancích, proto bude tato práce respektovat již zmíněné dělení. Výjimku z toho tvoří snad jen dělení na astronomické rušivé osvětlení a ekologické rušivé osvětlení, kdy první z nich negativně ovlivňuje astronomická pozorování a druhé živé organismy.

Všechny formy rušivého osvětlení se obvykle vyskytují pohromadě a jejich charakter se liší podle jejich původu a také měřítka, v jakém jsou vnímány a měřeny.

2.1.1 Závojevý jas oblohy

Závojevý jas oblohy (anglicky *sky glow*) je také lidově nazýván světelným smogem. Vzniká při rozptylu světla z umělého osvětlení (ať již přímo vyzářeného, nebo odraženého od povrchů) v atmosféře od aerosolových částic zde se vyskytujících. Podobně výrazný vliv jako aerosoly má na závojevý jas vodní pára rozptýlená v atmosféře. Závojevý jas je pravděpodobně nejpodstatnější složkou rušivého osvětlení pro astronomii. Jeho příklad je uveden na Obr. 2-1. Je to také pro tuto práci nejpodstatnější druh rušivého osvětlení.



Obr. 2-2 Příklad výrazného závojevého jasu oblohy [4]

Závojevý jas oblohy vykazuje poměrně silnou závislost na spektrální distribuci světelného zdroje, který jej způsobil. Obecně se dá tvrdit, že z hlediska tohoto druhu rušivého osvětlení je vhodné používat světelné zdroje s nižší CCT, jelikož lidské oko je nejvíce citlivé na vlnové délky v pásmu zelené barvy, kterých světlo světelných zdrojů s nižší CCT neobsahuje tolik. Citlivost lidského oka se navíc v prostředí s nižší intenzitou osvětlení vlivem Purkyňova efektu posunuje směrem ke kratším vlnovým délkám, tedy až do pásma modré barvy, kterého například většina LED světelných zdrojů obsahují poměrně nezanedbatelné množství. Luginbuhl et al. v [5] uvádějí, že LED světelný zdroj s $CCT = 5100\text{ K}$ produkuje téměř $8\times$ více závojevého jasu než LPS výbojka se stejným užitečným světelným tokem ve srovnatelném svítidle.

2.1.2 Rušivé oslnění

Oslnění neboli anglicky *glare* je nepříznivý stav zraku, ke kterému dochází obecně tehdy, pokud je kontrast jasu nebo jas samotný vyšší než hodnota, na kterou je adaptován lidský zrak. Má za následek snížení zrakové pohody, zvyšuje celkovou únavu i případné riziko úrazu [3]. Rušivé světlo je také zobrazeno na Obr 2-1.

Oslnění jako takové se hodnotí činitelem oslnění. Výpočet tohoto činitele vychází z myšlenky, že čím vyšší je jas zdroje oslnění a prostorový úhel, pod kterým je tento zdroj pozorován, tím hůře se oslňující zdroj na zrakové pohodě projevuje. Oslnění naopak není tolik výrazné, pokud je oslňující zdroj pozorován proti pozadí s vyšším jasnem. Záleží tedy prakticky na kontrastu obou jasů (a také na geometrii a poloze svítidla). Činitel oslnění od jednoho světelného zdroje určíme jako

$$G = \frac{L_z^a \cdot \Omega^b}{L_p^c \cdot P^d} \quad (1)$$

kde L_z je jas zdroje oslnění, Ω prostorový úhel, pod kterým je oslňující zdroj pozorován, L_p jas pozadí a P je činitel polohy dle Luckieshe a Gutha. Koeficienty a , b , c , d se určují empiricky a liší se podle konkrétní metody vyhodnocení oslnění.

Mezinárodní komise pro osvětlování doporučuje pro vyhodnocování oslnění používat Sørensenovu metodu, jejíž výsledkem je jednotný systém hodnocení oslnění alias UGR. Tato hodnotící metoda je implementována i v evropské a české legislativě [22]. Vztah pro výpočet UGR pro n zdrojů oslnění je následující:

$$UGR = 8 \cdot \log \left| \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n \frac{L_{zi}^2 \cdot \Omega_i}{L_p \cdot P_i^2} \right| \quad (2)$$

Empirické exponenty tedy nabývají pro tuto metodu hodnot 2, 1, 1, 2.

Výsledný činitel UGR obvykle spadá do rozmezí cca 10 až 30. Jeho vyhodnocení se provádí na základě Hopkinsonova kritéria a je následující:

Tabulka 2-1: Stupnice činitele oslnění UGR [28].

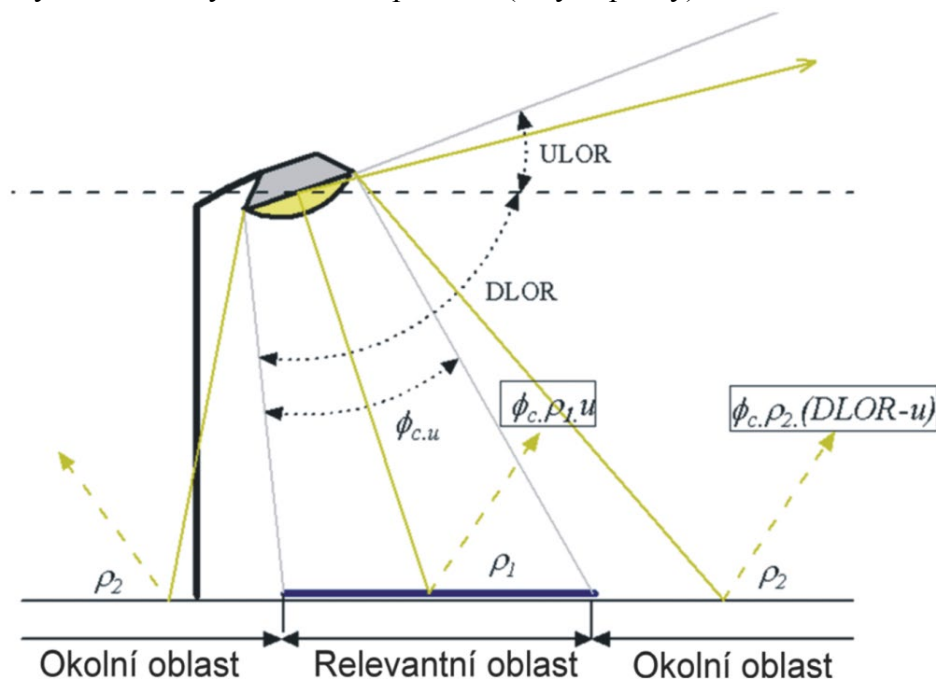
Oslnění	UGR
Neznatelné	10
Právě znatelné	13
Znatelné	16
Právě přijatelné	19
Nepřijatelné	22
Právě nepříjemné	25
Nepříjemné	28

2.1.3 Světelný přesah

Světelný přesah je obecně možno definovat jako nežádoucí světlo distribuované mimo hranice jeho funkčního prostoru – viz Obr 2-1. Může se projevovat jako zvýšená osvětlenost vertikálních ploch, které nebyly původně zamýšleny jako funkční plocha pro dané svítidlo. Je problematický, jelikož zvyšuje energetickou náročnost osvětlovací soustavy a také v případě, že se jedná o lampy VO, svítící do oken okolo stojících domů snižuje soukromí a kvalitu spánku zde žijících obyvatel. Toto je také typickým příkladem tohoto druhu rušivého osvětlení.

2.1.4 Podíl horního světla ULR

Podíl horního světla aneb ULR je vlastně spíše veličinou popisující podíl světelného toku, který se šíří do horního poloprostoru; ta významným způsobem přispívá ke zvyšování závojevého jasu oblohy. Jde jak o přímý vyzářený světelný tok, tak i světelný tok odražený od okolních povrchů (tedy nepřímý).



Obr. 2-3: Rozdělení světelného toku do poloprostorů. [3]

Celkový světelný tok vyzářovaný do horního poloprostoru lze určit jako

$$ULR = \varphi \cdot [ULOR + \rho_1 \cdot u + \rho_2 \cdot (DLOR - u)] \quad (3)$$

Kde platí, že φ je celkový světelný tok vyzářovaný svítidlem, $ULOR$ je poměrná část světelného toku vyzářovaného přímo do horního poloprostoru, $DLOR$ je poměrná část světelného toku vyzářovaného do dolního poloprostoru, ρ_1 je činitel odrazivosti relevantní oblasti, ρ_2 je činitel odrazivosti okolní oblasti a u je činitel využití světelného toku instalace [6].

2.2 Možnosti eliminace rušivého osvětlení

Rušivé osvětlení jako takové je pochopitelně negativním jevem a především v poslední době rostou snahy o jeho eliminaci, jelikož jeho úroveň ve většině lokalit spíše roste – dle publikace „*Light pollution handbook*“ o cca 3–6 % ročně.

Abychom mohli eliminovat rušivé osvětlení, musíme nejprve alespoň obecně charakterizovat způsob jeho vzniku. Zde ovšem vzniká problém, jelikož podíl jednotlivých původců rušivého osvětlení se liší nejen podle lokality, ale také na denní či roční době a dalších proměnných. Například Kuechly et al. v „*Aerial survey and spatial analysis of sources of light pollution in Berlin, Germany*“ uvádí, že v Berlíně jsou za největší zdroj rušivého osvětlení považovány ulice (tedy VO, světlomety aut, osvětlené reklamy a podobně), které se na celkovém rušivém osvětlení podílejí 31,6 %. Následují průmyslové a obchodní zóny s 15,6 % a oblasti veřejných služeb (školy, nemocnice, úřady) s 9,8 %. Dalšími v pořadí jsou samotné bloky obytných budov (8 %), samotné centrum města (6 %) a místní letiště (4 %).

Naproti tomu Luginbuhl et al. v „*From The Ground Up I: Light Pollution Sources in Flagstaff, Arizona*“ uvádí, že ve Flagstaffu v Arizoně jsou největším původcem rušivého osvětlení průmyslové a obchodní zóny s 36 %, sportovní areály (32 %), dopravní cesty (12 %) a obytné zóny (9 %). Oba zmíněné články ovšem používají odlišnou metodologii, kdy první zmíněný vycházel z leteckého snímkování nočního města a druhý z pozemního měření jasových map oblohy, nicméně je zde patrný nesoulad naměřených hodnot, který pravděpodobně nelze odůvodnit pouze jinou metodou měření a výpočtu.

Z těchto informací vyplývá, že konkrétní možnosti eliminace RO by měly vycházet z dané situace v řešeném místě a pro jejich nejlepší účinnost nelze použít univerzální model – Kyba et al. v „*High-Resolution Imagery of Earth at Night: New Sources, Opportunities and Challenges*“ uvádí, že jas oblohy nad obcí určité velikosti v USA je přibližně 3–5× větší než jas oblohy nad sídlem podobné velikosti v Německu. Takovéto rozdíly by bylo patrně možno nalézt napříč všemi státy, situace v Česku je do jisté míry odlišná od Německa a do jisté míry srovnatelná s Polskem či Maďarskem. (Ovšem o těchto specifikách našeho regionu žádná publikace patrně zatím nepojednává.)

I přes velkou individualitu situací v jednotlivých oblastech světa lze ovšem některá pravidla aplikovat téměř na jakoukoliv lokalitu a situaci. Zejména se jedná o následující stanoviska [6]:

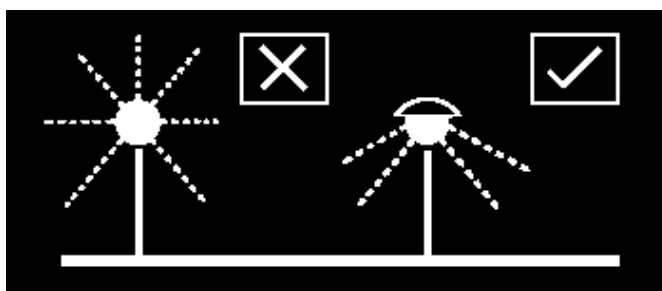
- a) Zvážit, zda je třeba celonoční provoz dané osvětlovací soustavy. Zatímco některé svítidla či soustavy svítidel musí zůstat v provozu po celou dobu nedostatečné hladiny přirozeného osvětlení, jiná (typicky například parkoviště obchodních domů a firem, osvětlení reklam či dekorativní osvětlení) by po velkou většinu noci mohla být vypnutá, aniž by došlo ke snížení bezpečnosti či komfortu uživatelů.

- b) Nepřesvětlovat osvětlovaná místa více, než je nutné. V mnoha případech lze dostát požadavkům norem a uživatelů i s nižší hladinou intenzity osvětlení, než je nutné. S tímto bodem také souvisí případná regulace osvětlení dle aktuálních podmínek. Důležité je i správné seřízení senzorů pohybu či lidské přítomnosti, aby nedocházelo ke spínání osvětlení vlivem pohybu osob mimo osvětlovanou oblast.

Oba tyto přístupy mají také výhodu v nezanedbatelných ekonomických úsporách vlivem nižší spotřeby elektrické energie, potažmo i delší životnosti světelných zdrojů.

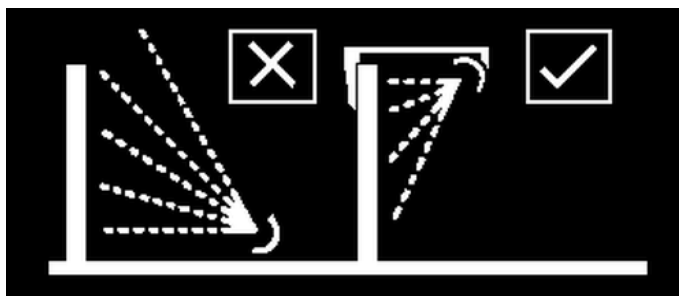
Další přístupy k omezování rušivého osvětlení souvisejí s geometrií svítidla a jeho umístěním:

- c) Užití vhodných stínidel, clon, a jiných technických prostředků k zamezení přímému vyzařování svítidla do horního poloprostoru. Tento způsob omezení rušivého osvětlení umožňuje v určitých případech naprosto markantní zlepšení situace, jelikož stále existuje (typicky například v parcích) velké množství svítidel, které většinu světelného toku vyzařují přímo do horního poloprostoru.



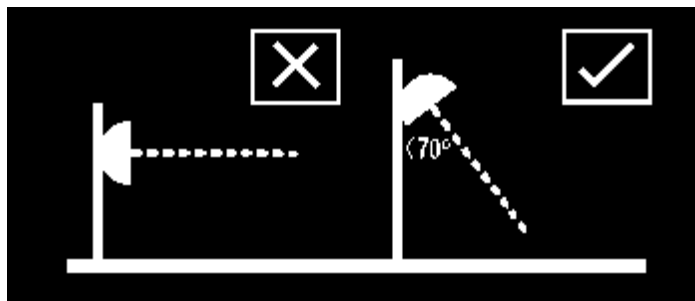
Obr. 2-4 Eliminace přímého vyzařování svítidla do horního poloprostoru. [12]

- d) Při osvětlování svislých ploch je vhodné tyto osvětlit směrem seshora dolů, tak totiž dojde k eliminaci světelného přesahu nad osvětlovanou plochou, a tedy i ke snížení vyzařování svítidla do horního poloprostoru. V případě, kdy tuto možnost nemáme, lze využít vhodné směrování či zaclonění dole umístěného svítidla tak, aby byl světelný přesah nad osvětlovaným objektem co nejmenší.



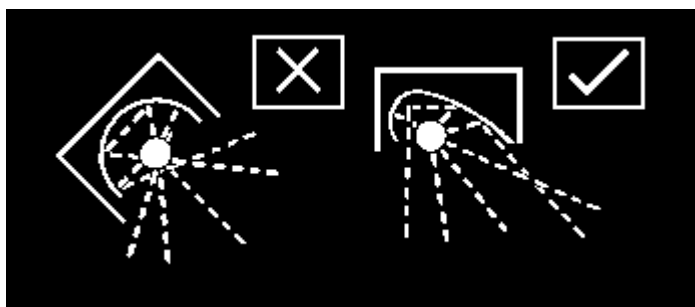
Obr. 2-5 Nevhodný a vhodný způsob osvětlování svislé plochy. [12]

- e) Pro eliminaci oslnění je nutné, aby byla co největší část světelného toku svítidla vyzářena pod úhlem menším než přibližně 70° . Nejen, že se tímto krokem zvýší efektivita osvětlování vodorovné plochy pod svítidlem, ale také podstatně klesne podíl světla, které může způsobit nepříjemné oslnění. Pozitivní vliv na tento faktor má také umístění svítidla výš nad osvětlovanou plochu.



Obr. 2-6 Nevhodný a vhodný způsob osvětlování horizontální plochy. [12]

- f) Použití svítidla s asymetrickým vyzařováním, které dokáže efektivněji směřovat světelný tok. Přední krycí sklo je obvykle udržováno paralelně k osvětlované rovině.



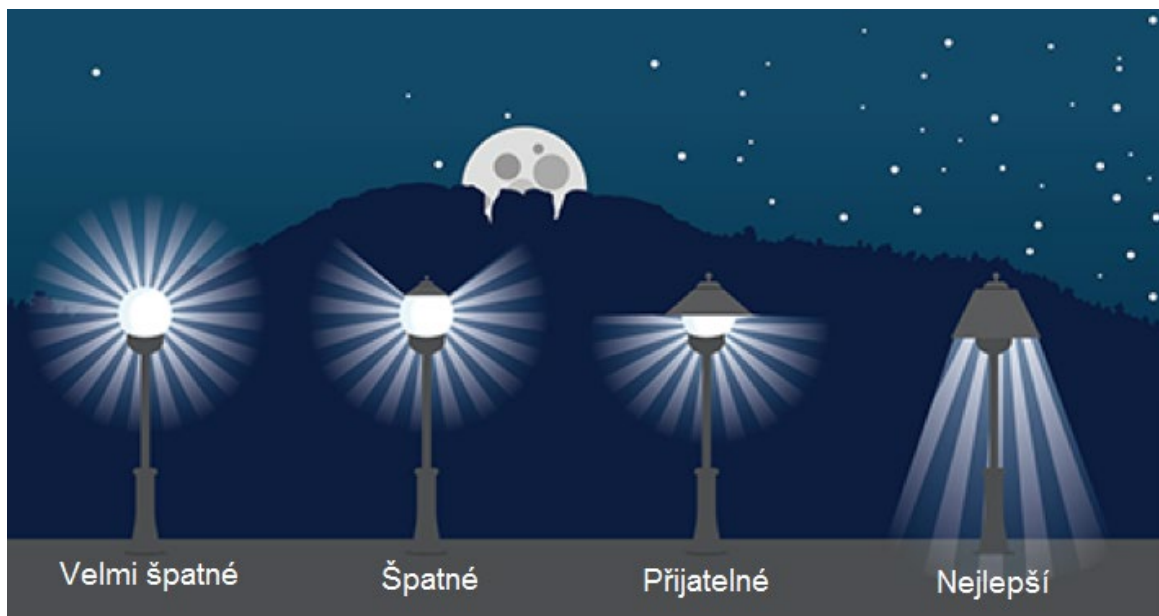
Obr. 2-7 Svítidla se symetrickým a asymetrickým vyzařováním. [12]

Nezanedbatelný vliv na hladinu rušivého osvětlení (respektive zejména astronomického rušivého osvětlení neboli závoje jasů oblohy) má také spektrum použitého světelného zdroje. Jak bylo uvedeno v kapitole 2.1.1, vhodnější jsou v tomto ohledu světla s nižší CCT, tedy například amber LED nebo sodíkové výbojky. Přijatelné jsou i LED s CCT okolo 2700 K, tedy v pásmu teplé bílé. Další výhodou tohoto přístupu je také omezení podílu modré složky světla, která má negativní vliv na zdraví lidí i na životní prostředí.

Obecně tedy můžeme shrnout možnosti eliminace rušivého osvětlení do následujících bodů:

- 1) Osvětlujeme pouze tam a tehdy, kde a kdy je to nutné.
- 2) Osvětlujeme nejmenším možným množstvím světla, případně využíváme regulaci dle aktuálních podmínek (ideálně automaticky pomocí senzorů).
- 3) Používáme typ a umístění svítidel, který nemá světelný přesah mimo osvětlovanou oblast.
- 4) Používáme světelné zdroje s nízkou náhradní teplotou chromatičnosti.

Bod c) tohoto výčtu lze ilustrovat i následujícím způsobem.



Obr. 2-8 Srovnání konstrukcí svítidel VO. [13, upraveno]

Na obrázku 2-8 je jednoznačně vidět snaha omezit přímé vyzařování do horního poloprostoru, která je pro omezení rušivého osvětlení (potažmo závojevého jasu oblohy) velmi žádoucí. Dalším přínosem je, jak už bylo zmíněno, snížení energetické náročnosti osvětlovací soustavy využívající více zacloněná svítidla, jelikož je zužitkován větší podíl světelného toku vyzářeného svítidlem.

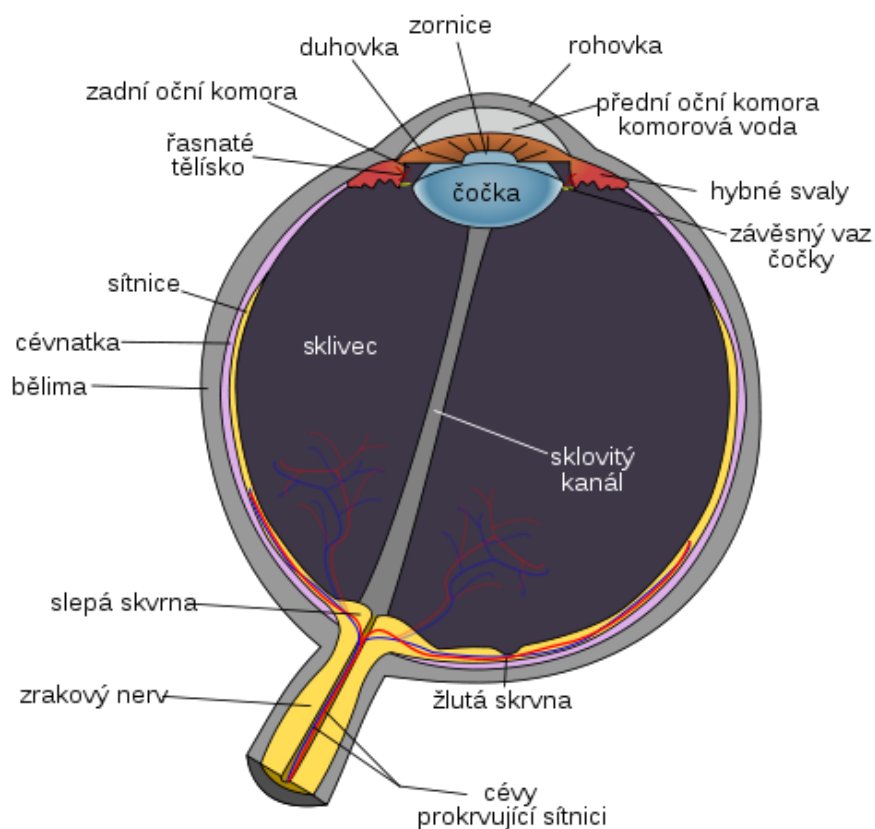
3. SVĚTLEM OVLIVNITELNÉ SOUSTAVY LIDSKÉHO TĚLA

Na lidský organismus má rušivé osvětlení množství negativních vlivů, které lze kategorizovat do několika skupin, případně lze popsat soustavy lidského těla, které jsou (rušivým) osvětlením obecně ovlivňovány.

3.1 Lidské oko a zraková soustava

Dospělý člověk obecně přijímá zrakem více jak 90 % informací o světě kolem něj, proto je velmi důležité, aby měla zraková soustava pro plnění své funkce optimální podmínky. Těmi se myslí především zrakový výkon a zraková pohoda. Tyto podmínky jsou velmi ovlivněny osvětlením dané vnímané scény, například zbytečně vysoká či naopak nízká hladina osvětlenosti, nerovnoměrnost osvětlenosti nebo rušivé oslnění dokážou negativně ovlivnit funkci lidského oka, případně zcela zabránit správnému vnímání informací.

Lidské oko má přibližně tvar koule a je schopno adaptace na velmi velký rozsah osvětleností (od cca 0,25 až po 10^5 lx) [22].

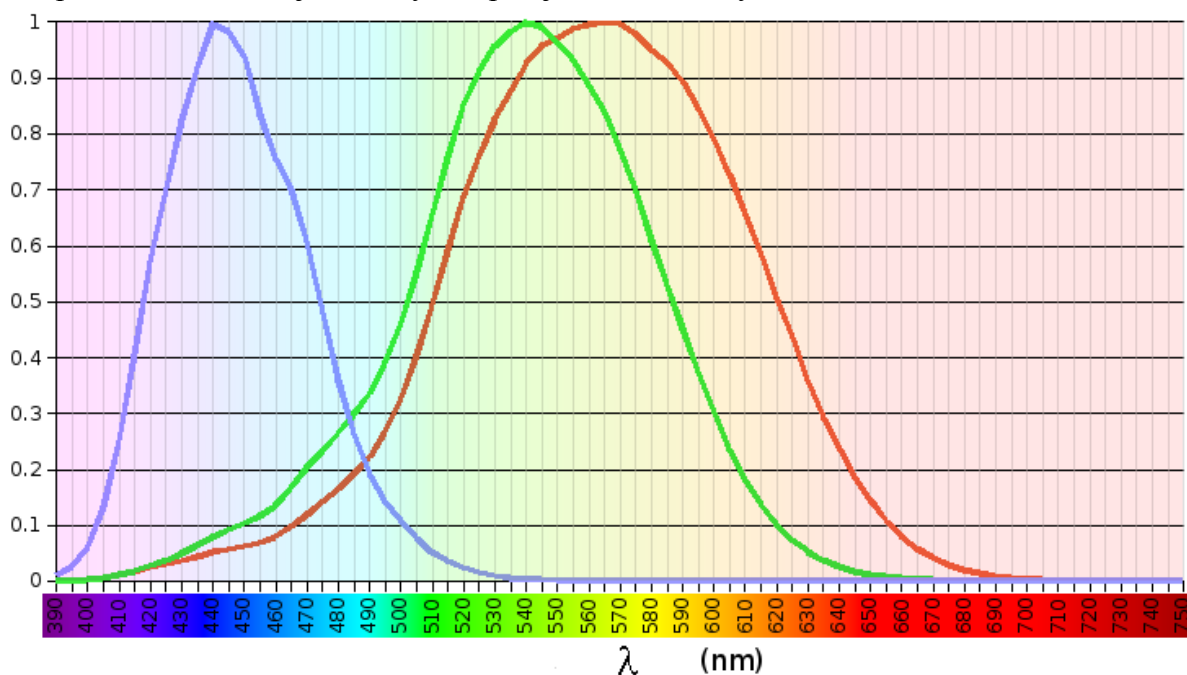


Obr. 3-1: Schéma lidského oka. [29]

Nitrooční prostor se skládá především z přední a zadní oční komory, čočky a sklivce.

Oční stěna je tvořena povrchovou, střední a vnitřní vrstvou. Povrchová vrstva je tvořena vazivem a skládá se z rohovky a bělimy. Střední vrstva zahrnuje cévnatku, řasnaté tělísko a duhovku. Vnitřní vrstva, také označována jako nervová, je tvořena sítnicí. Na sítnici se nachází tyčinky a čípky, kde vzniká samotný proces vidění – světelná informace je zde přeměněna na nervové vzruchy, které jsou dále přenášeny zrakovým nervem do mozku. Čípky jsou schopny rozpoznávat barvu a slouží pro vidění fotopické, tedy za dostatečné hladiny osvětlení, tyčinky naopak pro vidění skotopické, čili prakticky rozeznávají světlo a tmu, respektive jas. Mezi oblastmi fotopického a skotopického vidění se ještě nachází oblast vidění mezopického čili smíšeného, kde obraz snímají jak tyčinky, tak čípky [30].

Fotopické vidění se uplatňuje v situaci, kdy je jas pozorovaného objektu či scény větší než cca 100 cdm^{-2} . Vyznačuje se poměrně rychlou adaptací na světelný vjem, přibližně 20–60 s. Čípky, kterých je na sítnici přibližně 6 milionů, se dále dělí na tři typy, a to podle pigmentu, který obsahují v cytoplasmě. Toto dělení je na typ S neboli β , citlivé v pásmu vlnových délek 400–500 nm, typ M neboli γ pro vlnové délky 450–630 nm a typ L, případně ρ , který je nejcitlivější na vlnové délky mezi 500 a 700 nm [31]. Spektrální citlivosti jednotlivých čípků jsou znázorněny v obrázku 3-2.



Obr. 3-2: Spektrální citlivosti čípků. [32]

Tyčinek, zprostředkujících skotopické vidění je na sítnici mnohem více, přibližně 125 milionů, a jsou umístěny stejně jako čípky na sítnici nerovnoměrně. Nejvíce tyčinek je v okrajových částech sítnice, čípky jsou nejzastoupenější v centrální části, zejména v oblasti tzv. žluté skvrny [30].

Zraková soustava je pro účinky rušivého osvětlení velmi podstatná, jelikož je v první řadě sama negativně ovlivňována například rušivým oslněním, ale také zde vznikají vlivem rušivého osvětlení vjemy, které následně ovlivňují další soustavy lidského těla, kteréžto jsou popsány níže.

3.2 Chronotypy a cirkadiánní rytmy

Cirkadiánní rytmy, jejichž název pochází z latiny (circa = přibližně, diem = den), patří mezi biologické rytmy člověka. Doba opakování je, jak již název napovídá, přibližně 24 hodin, ale může nabývat hodnot od 20 do 28 hodin. Tyto rytmy jsou řízeny hypothalamem, konkrétněji tedy superchiasmatickými jádry, které se v hypothalamu nacházejí [33]. Tato oblast lidského mozku se nachází v přímé blízkosti očí, prakticky hned za nimi. Zkoumáním tohoto odvětví se zabývá chronobiologie.

Tyto rytmy jsou podmíněny vnímáním světla, ovšem existují i v prostředí, kdy je člověk ponořen do časové izolace a nemá možnost vnímat střídání dne a noci. V takovém případě dojde k prodloužení tohoto rytmu v průměru asi o půl hodiny [36].

Prakticky všechny orgány lidského těla mají vlastní rytmus, ovšem nezastupitelnou roli cirkadiánních rytmů je vzájemná synchronizace těchto orgánových hodin. Pokud dojde ke vzájemnému rozladění těchto biologických taktů, nastává jev zvaný chronodisrupce, který může ohrožovat zdraví a rozhodně nepřispívá ke kvalitě lidského života. Cirkadiánní rytmy se dají zjednodušeně rozdělit na tři roviny – biologická úroveň, chemická úroveň a psychogenní úroveň.

Na biologické úrovni dochází typicky k regulaci teploty lidského těla, na chemické jsou ovlivňovány, potažmo řízeny některé žlázy s vnitřní sekrecí, konkrétněji je řízena sekrece melatoninu, růstového hormonu a kortizolu. Negativní vliv rušivého osvětlení na tyto soustavy je popsán v kapitole 3.3. Na psychogenní úrovni je podstatný vliv cirkadiánních rytmů na nálady, ať už dlouhodobé, tak okamžité [35].

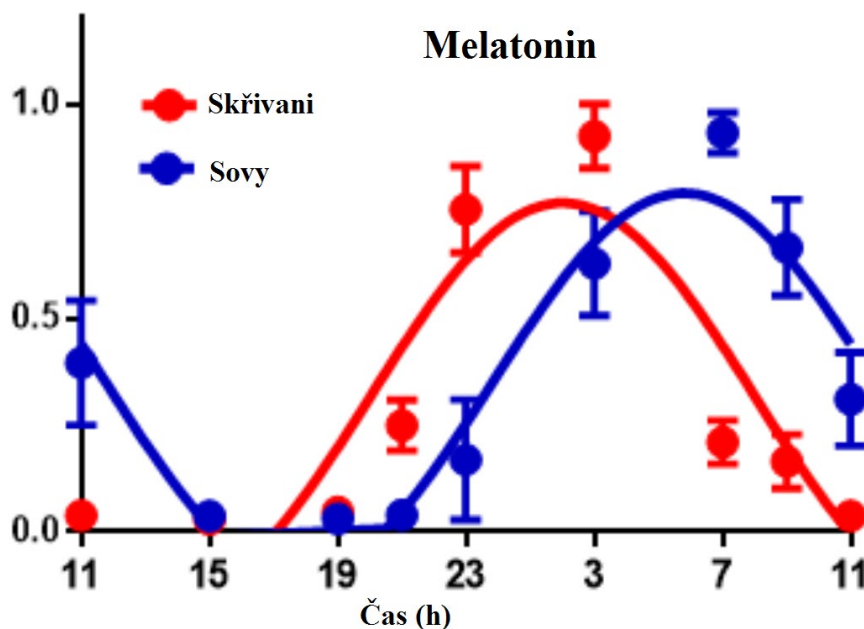
Podle preferovaných časů spánku a aktivity lze lidskou populaci rozdělit na několik kategorií, tzv. chronotypů. Nejčastější dělení podle chronotypů zahrnuje 3 kategorie, a to ranní typ (skřivani), neutrální typ a večerní typ (sovy). Chronotyp jedince se v průběhu života obvykle mění – malé děti a senioři bývají často skřivani, zatímco pro dospívající a mladé dospělé obvykle platí, že preferují pozdnější aktivitu, tudíž se jedná o sovy. Osoby spadající do ranního chronotypu preferují vstávání kolem rozbřesku, v průměru okolo šesté hodiny ránní, naopak ke spánku se ukládají poměrně brzy večer, typicky kolem desáté hodiny večerní. Jedinci spadající pod večerní chronotyp naopak vstávají kolem poledne, pokud mají tu možnost, zato spát chodí pozdě v noci, obvykle mezi druhou až čtvrtou hodinou ránní [36].

Tyto chronotypy se odlišují nejen v preferencích ohledně rozvrhu dne, ale také lze vypořádat i charakterové rozdíly mezi oběma skupinami. Walker et al. ve svém článku z roku 2015 *Personality, time-of-day preference, and eating behavior: The mediational role of morning-eveningness* popisují, že skřivani obvykle více dbají na životosprávu, zatímco sovy mají sklony k nezdravějšímu životnímu stylu a více kalorií

přijímají pozdě v noci. Sovy také častěji trpí nekvalitním spánkem, jelikož lidská společnost obvykle více nahrává skřivanům, tedy nutí sovy vstávat v časech, kdy na to jejich organismus není připraven [34].

Osoby spadající do kategorie skřivanů lze také obvykle častěji charakterizovat jako více motivované jedince se sklony k perfekcionismu, vyšší motivaci a pozitivním vztahem k práci. Také lze u nich vyzorovat větší toleranci řádu a autorit a svědomitost. Oproti tomu sovy si často život méně organizují, více podléhají závislostem a mají větší sklony k civilizačním chorobám. Najdeme mezi nimi typicky více umělecky a kreativně orientovaných lidí, a i přes obvykle lehce nižší prospěch v období studia mají inteligenční kvocient IQ srovnatelný nebo lehce vyšší než skřivani. Mezi sovami je také větší podíl jedinců s větším BMI [34].

Jelikož jednotlivé chronotypy mají odlišně nastavené cirkadiánní rytmy, pochopitelně mají v průběhu dne i vzájemně posunuté průběhy hladiny melatoninu. Nováková et al. uvádí v *Human chronotype is determined in bodily cells under real-life conditions* následující průběhy:



Obr. 3-3: Fázově posunutá sekrece melatoninu u ranních a večerních chronotypů. [36, upraveno]

Relativně neznámý je zatím původ rozdělení populace do jednotlivých chronotypů, jelikož nejde o jev, který by se objevil teprve nedávno, ale nejspíš jde o určitý způsob adaptace lidského organismu na vnější podmínky. Za poměrně moderní je naopak považován problém tzv. sociálního jet-lagu, což by se dalo charakterizovat jako chronický nedostatek spánku vlivem sociálního tlaku na časování aktivit. Tento stav je poměrně nebezpečný, jelikož časem hrozí vývoj závažné chronodisrupce se všemi negativními jevy, které s sebou přináší [34].

3.3 Negativní dopady rušivého osvětlení na endokrinní soustavu

Endokrinní soustava, respektive její části náchylné na negativní vlivy rušivého osvětlení úzce souvisí s cirkadiánními rytmy. Obecně se dá tvrdit, že rušivé osvětlení má vliv na produkci melatoninu, tedy hormonu epifýzy, který je nezbytný pro zdravý spánek. Mimo tento hormon je rušivým světlem ovlivněna i produkce stresového hormonu kortizolu a v neposlední řadě i tělesná teplota. Melatonin do velké míry řídí biologické hodiny organismu (správněji tedy cirkadiánní rytmus). I malá hladina osvětlenosti během noci dokáže podstatně zmenšit až zcela zamezit produkci melatoninu, což má ovšem často za následek výskyt poruch spánku, sezonní deprese, obezity, cukrovky a řady dalších onemocnění [37]. Drahoňovská v článku „*Vliv světelného znečištění na veřejné zdraví*“ uvádí, že například již zmíněné sezonní deprese (označované přiléhavou zkratkou SAD) se projevují významněji například u obyvatel severských zemí, kde je nedostatek přirozeného světla nahrazován umělým osvětlením ještě výrazněji, než je obvyklé u nás. Mezi symptomy patří například permanentní únava, snadná unavitelnost, útlum aktivity a pokles schopnosti se koncentrovat a učit se [11]. Tuto poruchu a její symptomy by bez nadsázky bylo možné označit za civilizační chorobu.

Největší vliv na produkci melatoninu má zejména modré světlo o vlnových délkách cca 450–500 nm. Ve chvíli, kdy je člověk vystaven ve večerních hodinách světlu o dostatečné intenzitě (Cajochen et al. v *High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength Light* udává, že k pozastavení produkce melatoninu stačí již hladiny osvětlenosti 1,5 lx pro monochromatické záření kritických vlnových délek, případně hodnoty pod 100 lx pro širokospektrální záření všech vlnových délek), melatonin se již v těle nedokáže takto rychle vytvořit a dochází ke zhoršení kvality spánku a ostatním negativním efektům rušivého osvětlení.

Skene a Swaab ve článku *Melatonin rhythmicity: effect of age and Alzheimer's disease* popisují pozitivní vliv melatoninu na příznaky Alzheimerovy choroby. Melatonin totiž potlačuje brzké umírání mozkových buněk a tím oddaluje stárnutí mozku. Je pravděpodobné, že pozitivní efekt má melatonin i na Parkinsonovu chorobu (podobným mechanismem jako na Alzheimerovu chorobu) [38]. Rušivé osvětlení má tedy negativní vliv i na vývoj těchto neurodegenerativních chorob.

Existují i domněnky, že melatonin má schopnost do určité míry zpomalovat stárnutí. Zdraví senioři mají obecně více melatoninu než jejich vrstevníci, kteří trpí nějakou chorobou. Je ovšem otázkou, zda se jedná o následek, nebo příčinu. Této problematice se věnuje například Reiter v *Potential Biological Consequences of Excessive Light Exposure*. Pokud by tato teorie byla potvrzena, znamenalo by to negativní vliv rušivého osvětlení i na stárnutí lidského organismu.

3.4 Karcinogenní vlastnosti rušivého světla

Mezi další nepříznivé důsledky vystavení rušivému osvětlení patří i zvýšený výskyt některých druhů rakoviny. Nejmarkantnější je toto působení ALAN na nádory, které ke svému růstu potřebují hormony, právě z důvodu, že endokrinní soustava je ovlivněna rušivým osvětlením ze všech biologických systémů těla prakticky nejvíce [39].

Nejzásadnější vliv má nedostatek melatoninu zejména na rakovinu prsu a prostaty (Stevens et al., *Breast cancer and circadian disruption from electric lighting in the modern world*, 2013). Studie provedená na univerzitě v Haifě [40] ukazuje, že v zemích s nejvyšším podílem ALAN je incidence rakoviny prsu o 30 až 50 % větší než v zemích s malým podílem rušivého osvětlení. U jiných druhů rakoviny u žen (rakovina plic, tlustého střeva, hrtanu, jater) taková korelace nebyla prokázána. Je to pravděpodobně zejména proto, že tyto druhy rakoviny nezávisí na hladině hormonů v lidském organismu. Rušivé osvětlení potlačuje přirozenou produkci melatoninu, který do jisté míry předchází vzniku uvedených typů zhoubného bujení. Tento mechanismus ochrany před rakovinným bujením spočívá s největší pravděpodobností v tom, že melatonin potlačuje aktivitu buněk, které by jinak měly tendenci způsobovat rakovinu (Reiter et al., *Light pollution, melatonin suppression and cancer growth*, 2006). Dalším faktorem je také to, že hladina melatoninu v organismu má vliv na produkci jiných hormonů, v tomto případě zejména pohlavních.

Krom samotného melatoninu mají na vznik rakoviny prsu podíl nejspíš i geny související s cirkadiánním rytmem. Konkrétně se jedná o gen CLOCK – zdravé ženy z kontrolní skupiny vykazovaly nižší expresi tohoto genu než ženy s rakovinou prsu [41]. Tento gen má výrazný vliv jak na periodu, tak na „plasticitu“ cirkadiánních rytmů.

WHO klasifikuje práci na směny s narušením cirkadiánního rytmu jako možný karcinogen. Tento vliv na výskyt rakoviny je tak podstatný, že například Dánsko uznává rakovinu prsu vlivem střídání směn jako nemoc z povolání. Obecně osoby, pracující ve směnném provozu jsou tímto ovlivněny pravděpodobně nejvíce, právě z důvodů velmi narušených cirkadiánních rytmů.

Tatsuhiko et al. ve studii *Prospective Cohort Study of the Risk of Prostate Cancer among Rotating-Shift Workers: Findings from the Japan Collaborative Cohort Study* uvádí, že práce v nepravidelném směnném provozu je spojena s trojnásobným rizikem rakoviny prostaty u mužů. Zaměstnanci pracující výlučně v noci také vykazovali určité zvýšení incidence rakoviny prostaty, ovšem tato změna nebyla oproti kontrolní skupině zdaleka tak dramatická.

Z uvedených příkladů vyplývá, že rušivé osvětlení působí na určité druhy rakoviny jednoznačně negativně a nepřímo – primárně je ALANem ovlivněna sekrece melatoninu, tato odchylka nadále ovlivňuje některé ostatní žlázy s vnitřní sekrecí, jejichž hormony mohou mít přímý vliv na vznik a růst nádorů.

4. VLIV RUŠIVÉHO OSVĚTLENÍ NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Světlo je existenčně důležitý faktor pro téměř všechny živé organismy, to stejné ovšem platí i pro pravidelné střídání dne a noci. Umělé osvětlení může mít pro řadu organismů matoucí až fatální důsledky, což lze souhrnně pojmenovat jako ekologické rušivé osvětlení. Tento pojem byl poprvé definován v článku „*Ecological Light Pollution*“ (Longcore, Ritch, 2004). Ekologické rušivé osvětlení je ve své podstatě hůře odstranitelné než astronomické, jelikož k němu přispívá skutečně každý venkovní světelný zdroj, nejen světelné zdroje špatně navržené či umístěné.

4.1 Rostliny

Světlem a jeho kvalitou a množstvím jsou ovlivněni nejen živočichové, ale i rostliny. Nejcitlivější jsou zejména na modrou a červenou složku světla, kdy modré světlo podporuje růst a červená složka světla zase ovlivňuje rostlinu z hlediska růstových změn v průběhu roku, tedy kvetení, vývoj plodů, klíčení semen a podobně.

ALAN nemá takovou intenzitu, aby v noci způsoboval fotosyntézu, ovšem zejména červená složka světla je pro rostliny nebezpečná, pokud jsou jí ozářeny v nevhodnou dobu. Délkou světelného dne je také řízen shoz listů listnatých stromů a jiné další rostlinné procesy. Pokud je například listnatý strom v noci ozářen světlem s nezanedbatelným podílem červené složky, dojde k pozdějšímu opadu listů, což může během zimních bouří a vichřic způsobit poškození celého stromu. V tomto ohledu jsou pro stromy nejnebezpečnější tepelné světelné zdroje (žárovky a halogenové žárovky) a vysokotlaké sodíkové výbojky, jelikož jejich světlo obsahuje větší podíl červené složky [42]. V centru New Yorku stromy typicky kvůli tomuto jevu opadávají o měsíc později než v jeho okolí [44]. Na jaře zase stromy v místech, kde je vliv rušivého osvětlení silnější, nasazují listy dříve, než by bylo přirozené [45]. Vliv lampy VO na opadávání listů je ilustrován na obrázku 4-1.

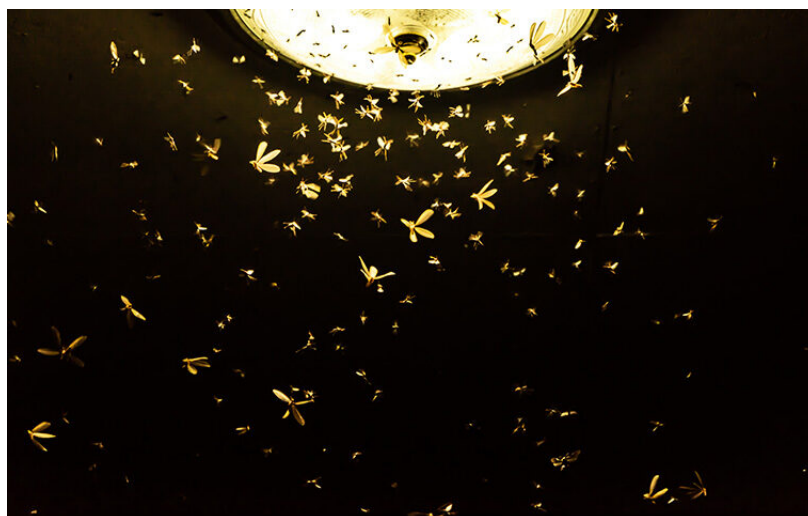


Obr. 4-1 Vliv lampy VO na opadávání listů javoru. [43]

Některé druhy kaktusů, jmenovitě například druh *Selenicereus grandiflorus*, kvetou pouze v noci (konkrétně tento druh navíc pouze asi jen dvě hodiny). Zvýšená hladina osvětlenosti pak může znamenat, že tyto kaktusy nikdy nevykvetou, tudíž jim ALAN zabránil v rozmnožení se, což v extrémním případě může vést až k vyhynutí celého druhu [41].

4.2 Hmyz

Podstatný vliv má rušivé osvětlení na hmyz, především tedy na druhy aktivní hlavně v noci. Hmyz je v noci typicky přitahován světlem umělých světelných zdrojů, což má za následek jeho dezorientaci a následně často jeho smrt v důsledku vyčerpání či ulovení predátorem [2]. Hmyz je obecně více ovlivňován světlem s vyšším podílem světla s kratší vlnovou délkou. Eisenbeis ve článku *Artificial night lighting and insects: Attraction of insects to streetlamps in a rural setting in Germany* uvádí, že světlo vysokotlakových rtuťových výbojek přitahuje hmyz přibližně trojnásobně v porovnání se světlem vysokotlakých sodíkových výbojek. Tamtéž je také uvedeno, že ALAN má jen v Německu na svědomí mezi 60 a 130 miliardami uhynulých hmyzích jedinců ročně. Tento odhad zahrnuje pouze lampy VO a nepočítá s reklamním či dekoračním osvětlením [47].



Obr. 4-2 Hmyz přitahovaný a dezorientovaný lampou [8]

ALAN působí zvlášť na hmyz z rodu Světlušek. Jelikož tento rod využívá bioluminiscenci pro vyhledání partnera k páření, rušivé osvětlení dokáže tento mechanismus podstatným způsobem narušit. Výzkum ukázal, že Světlušky reagují na viditelné světlo prakticky všech vlnových délek. Nejsilněji byl tento rozmnožovací mechanismus narušen světlem jantarové barvy, tedy bílým světlem s nízkou náhradní teplotou chromatičnosti, případně oranžovožlutým světlem. [46].

Brouci rodu Vrúbounů používají k navigaci světlo Mléčné dráhy, pokud není na obloze vidět Měsíc. Vlivem rušivého osvětlení může dojít i k narušení tohoto mechanismu [48].

4.3 Ryby

Nezanedbatelný vliv má rušivé osvětlení také na ryby. Ryby obecně vykazují negativní fototaxi, tedy jsou světlem odpuzovány a stejně jako u jiných organismů u nich světlo ovlivňuje sekreci hormonů, jmenovitě kortizolu a melatoninu. Brüning et al. ve svém článku *Spotlight on fish: Light pollution affects circadian rhythms of European perch but does not cause stress*, vydaném v roce 2014, uveřejnili výsledky, které naznačovaly tomu, že i hodnota osvětlenosti 1 lux stačí ke snížení produkce melatoninu o 75 %, alespoň tedy u studované skupiny Okounů říčních. Naopak u kortizolu nebyl tak výrazný vliv osvětlenosti na hladinu tohoto hormonu zaznamenán, bylo tedy učiněno pozitivní zjištění, že rušivé osvětlení ryby příliš nestresuje [2].

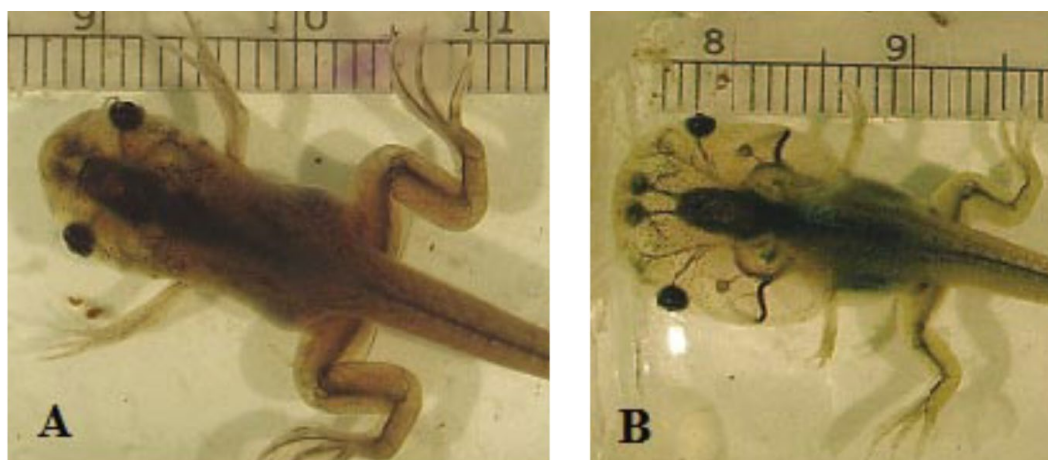
Na jiné druhy ryb může ALAN působit odlišně. Například na druh Živorodka duhová (*Poecilia reticulata*) působí vystavení rušivému osvětlení v době přirozené tmy tak, že se tyto ryby chovají během dne riskantněji, rychleji opouštějí úkryt a častěji se zdržují v nechráněných oblastech vodních ploch, což je vystavuje většímu riziku ulovení predátorem. Tímto výzkumem se zabýval například Kurvers et al. ve studii *Artificial Light at Night Affects Emergence from a Refuge and Space Use in Guppies*.

U ryb rodu Klaunů zase dochází vlivem rušivého osvětlení k poruchám reprodukčního cyklu. Dojde sice k naklazení a oplodnění vajíček, ze kterých se ovšem vlivem rušivého osvětlení nic nevyklíne. Tento jev dobře popisuje Fobert et al. v *Artificial light at night causes reproductive failure in clownfish*.

Zooplankton je rušivým světlem v noci silně přitahován, což jej vystavuje většímu riziku ulovení predátorem [49]

4.4 Obojživelníci

Obojživelníci jsou také rušivým světlem ovlivňováni. Střídání dne a noci má jistý vliv na vývoj pulců v dospělé jedince žab (Wise et al., 2007), kdy i malá hodnota osvětlenosti tento vývoj podstatně zpomalí.



Obr. 4-3 Stejně staří pulci druhu *Xenopus laevis*. Jedinec A vyrůstal v prostředí s přirozenou fotoperiodou, jedinec B v prostředí s rušivým osvětlením. [10]

Další vliv na žáby (které jsou především noční živočichové) je takový, že ovlivňuje jejich chování – při vyšší hladině intenzity osvětlení se bojí vyrazit na lov či za hledáním partnera (Rand et al., 1997). Také při přecházení pozemních komunikací žáby často ve světlech projíždějících automobilů strnou a stanou se tak obětí kolize [2].

Touzet et al. (2019) uvádí, že noční aktivita samců Ropuchy obecné je rušivým osvětlením ovlivnitelná také. Po 20 dnech, kdy byli samci vystaveni během období páření nočnímu světlu o intenzitě 5 luxů, jejich aktivita poklesla o více jak polovinu, při intenzitě 20 luxů pak téměř o tři čtvrtiny. Jelikož byla obě pohlaví těchto ropuch více ve stresu, poklesl jejich noční výdej energie o 18, respektive 38 % [50].

Jedinci žab, kteří byli v mládí a rané dospělosti vystaveni rušivému osvětlení, pak více trpěli napadením parazity a byli náchylnější k chemickým spáleninám posypovou solí [51].

Krátká terénní studie, zaměřená na vliv rušivého osvětlení na Mločíky popelavé (*Plethodon cinereus*), proběhla před několika lety v USA. Prokázala, že tomuto druhu stačí i relativně malá intenzita osvětlení o hodnotě 0,01 luxu, aby byla znatelně omezena jejich noční aktivita. Toto zjištění je z dlouhodobého hlediska problematické, jelikož snížená noční aktivita vede k menším příležitostem nalezení potravy, a tedy i menším šancím přežití zimy a úspěšného udržení stabilní populace těchto mločků v přírodě [52].

4.5 Želvy

Z hlediska mořských želv je rušivé osvětlení velmi problematické pro čerstvě vylíhlé jedince. Hned po vylíhnutí z vajec jsou totiž malé želvy instinktivně přitahovány směrem k nejjasnějším objektům, což v přirozeném prostředí bývá hladina moře, od které se odráží nebeská tělesa. Umělé zdroje osvětlení v blízkosti pláží tento mechanismus pochopitelně naprosto nabourává, jelikož je přitahuje směrem do vnitrozemí, kde tyto mladé želvy rychle hynou [54]. Tento problém je do jisté míry řešitelný náhradou světelných zdrojů za nízkotlaké sodíkové výbojky, jelikož jejich světlo oranžové barvy želvy příliš nepřitahuje [53].

Ve chvíli, kdy se mladé želvy dostanou do vody, ovšem nemají ještě vyhráno, jelikož světla ležící na pevnině je mohou nadále dezorientovat. Existují také hypotézy, že ALAN narušuje i hnízdící chování dospělých samic mořských želv [55]. Silva et al. ve studii *Light pollution affects nesting behavior of loggerhead turtles and predation risk of nests and hatchlings* uvádí, že umělé osvětlení pláží snižuje úspěšnost zahnízdění Karet obecných o 20 %. Hnízdění také trvá v průměru kratší dobu a želvy kladoucí vejce byly často nevhodně orientovány směrem k moři. Menší vliv na tyto želvy mají speciální světelné zdroje s velkým podílem červených složek světla a malým či nulovým podílem světla kratších vlnových délek.

Dalším faktorem, zmíněným ve výše uvedené studii je také to, že umělé osvětlení písčitých pláží s výskytem hnízd mořských želv stimuluje činnost predátorů živičích se želvými vejci.

4.6 Ptáci

Nezanedbatelný vliv má rušivé osvětlení i na ptáky. Nejpodstatnějším a nejlépe pozorovatelným vlivem je nejspíše to, že ranní zpěv zpěvných druhů ptáků se obvykle řídí podle míry osvětlení – tedy nejsilnější a nejkvalitnější samci začínají zpívat dříve než více zdegenerovaní jedinci. Pokud ovšem do těchto vzorců chování zahrneme vliv umělého osvětlení, začínají zpívat nejdříve samci nejbliže lamp umělého osvětlení, tedy i samičky ptáků jsou přitahovány k těmto jedincům, což může mít za následek vývoj slabší generace ptactva. Toto chování bylo pozorováno například u kosů, sýkorek či drozdů [9].

Buňáci a příbuzné druhy mořských ptáků jsou umělými zdroji světla (typicky lodě, majáky, ropné plošiny) velmi přitahováni, což může zejména v případě mladých jedinců, kteří právě vylétli z hnízda vést až k jejich smrti. Spolu s Albatrosy také tyto druhy mohou využívat noční nebe k navigaci, také často hledají svou kořist díky její bioluminiscenci. Tyto mechanismy pochopitelně ALAN narušuje, až zcela znemožňuje jejich správné fungování [56].

Senzaki et al. v článku *Sensory pollutants alter bird phenology and fitness across a continent* uvádí, že ALAN má velký vliv i na hnízdění velkého množství ptačích druhů. V prostředí luk a močálů způsobuje uspíšení začátku hnízdění (a snesení vajec, a tedy i líhnutí mláďat) v průměru o měsíc, v oblastech, kde převažují lesy je tento rozdíl oproti normálu v průměru 18 dní. Toto dřívější líhnutí mláďat může v extrémních případech způsobit až jejich úhyn, jelikož pro ně nemusí být nutně dostupná vhodná potrava. Tato studie zahrnovala více jak 58 tisíc pozorovaných hnízd celkem 142 ptačích druhů.

4.7 Létaví savci

Netopýrům a příbuzným létavým savcům umělé osvětlení zkracuje dobu lovu, což je znevýhodňuje v porovnání s jedinci žijícími mimo civilizované oblasti. Netopýři jsou noční tvorové a jako takoví jsou z velké většiny světlem odpuzováni. Ti, které světlo umělých světelných zdrojů tolik neovlivňuje, naopak mohou ze shluků hmyzu, vyskytujících se u venkovních lamp těžit, jelikož jim to usnadňuje lov. Ptáci i netopýři mohou také trpět četnými kolizemi s osvětlenými budovami [9].

Hmyz je obvykle nejvíce přitahován světlem s větším podílem krátkých vlnových délek, tudíž z tohoto hlediska mají dobré vlastnosti zejména nízkotlaké sodíkové výbojky, naopak vysokotlaké sodíkové výbojky přitahují hmyz (a tedy i netopýry) poměrně intenzivně.

Velmi negativně na létavé savce působí zdroje umělého světla poblíž jejich hnízdišť. Oddaluje totiž dobu, kdy po soumraku vyráží na lov, v extrémních případech jim v tom může zcela zabránit, pokud je rušivé světlo velmi intenzivní. To má pochopitelně velmi negativní dopad na prosperitu jejich populace [57].

5. VENKOVNÍ OSVĚTLOVACÍ SYSTÉMY

Venkovní osvětlovací systémy mají na rušivém osvětlení naprosto dominantní podíl. Ať už se jedná o instalaci VO z důvodu bezpečnosti dopravy, ochrany majetku, nasvícení budov či reklam, bezpečnosti chodců či jiného důvodu, vždy bude tento osvětlovací systém generovat určité množství rušivého osvětlení, které se bude někde negativně projevovat. Z tohoto důvodu je nutné alespoň rámcově nastínit základní charakteristiky venkovních osvětlovacích soustav a jejich dělení a způsob využití. Osvětlení venkovních komunikací se věnuje norma ČSN EN 13201 [14].

Její část ČSN EN 13201-2 (*Osvětlení pozemních komunikací – Část 2: Požadavky*) zahrnuje požadavek minimalizace účinků světla vyzařovaného mimo zamýšlený směr osvětlování – tedy rušivého osvětlení. Konkrétně se v této normě požaduje

- Ve venkovských nebo příměstských oblastech minimalizace rušivého působení osvětlovacích soustav při dálkových pohledech přes otevřenou krajinu.
- Minimalizace rušivého světla vnikajícího do nemovitostí a světla vyzařovaného do horního poloprostoru (tedy světla, způsobujícího závojevý jas).

Jako měřítko pro hodnocení rušivého světla doporučuje tato norma použít tříd clonění G, které byly původně určeny k omezení míry omezujícího oslnění osvětlovacími soustavami.

5.1 Druhy a využití venkovních osvětlovacích soustav

Sokanský et al. v [14] respektuje následující dělení:

- a) Osvětlení vnitřních částí měst a obcí
- b) Osvětlení vnějších částí měst a obcí

Tyto dvě kategorie se v rámci moderního urbanistického řešení ještě člení na

- 1) Osvětlení sídlišť
- 2) Osvětlení obchodních čtvrtí a pěších zón
- 3) Osvětlení klíčových komunikací a mimoúrovňových křižovatek

Dále mezi základní kategorie osvětlovacích soustav patří

- c) Osvětlení parků
- d) Osvětlení silnic, dálnic a vozovek se silnou dopravou
- e) Osvětlení podjezdů a podchodů
- f) Osvětlení tunelů
- g) Osvětlení parkovišť a odstavných ploch
- h) Dekorativní a slavnostní osvětlení (významné budovy, památky, umělecká díla).

Každá z těchto kategorií je charakterizována účelem a konkrétními požadavky, které vyplývají z dané situace v řešeném místě.

Veřejné osvětlení lze konstrukčně rozdělit na tři základní části – osvětlovací, napájecí, a řídicí systém. Osvětlovací systém v sobě zahrnuje především světelné zdroje a svítidla, dále pak nosné a podpěrné prvky jako stožáry nebo výložníky. Napájecí systém se sestává z elektrického rozvodu tvořeného kabely a rozvaděči, řídicí systém pak obsahuje spínací a řídicí prvky (spínací hodiny, senzory osvětlenosti...) [14].

Návrh soustavy VO obsahuje v zásadě následující kroky:

- a) Zatřídění komunikace
- b) Přiřazení stupně osvětlení
- c) Volba světelného zdroje a svítidla
- d) Návrh geometrických parametrů soustavy
- e) Kontrolní výpočet
- f) Zpracování finální projektové dokumentace

Samotné osvětlovací soustavy VO pak dle jejich geometrie uspořádání na

- a) Osové
- b) Jednostranné
- c) Vystřídané
- d) Párové

Z hlediska dopadu na životní prostředí v podobě rušivého osvětlení je pravděpodobně nejzásadnější vliv osvětlení pozemních komunikací, jelikož je ze všech kategorií nejpočetnější. Problematické je ale i architektonické osvětlení či osvětlení reklam, jelikož u něj často dochází k zásadním přesahům světelného toku do horního poloprostoru.

Samotná svítidla dle jejich charakteristiky rozložení světelného toku do poloprostorů lze členit následovně [14]:

Tabulka 5-1 Rozdělení svítidel podle jejich rozložení světelného toku [14].

Označení svítidla	DLOR [%]	ULOR [%]	Značení dle DIN 5040
Přímé	90-100	0-10	A
Převážně přímé	60-90	10-40	B
Smíšené	40-60	40-60	C
Převážně nepřímé	10-40	60-90	D
Nepřímé	0-10	90-100	E

Mezinárodní komise pro osvětlování CIE vytvořila směrnici CIE 126:1997 „*Guidelines for minimizing sky glow*“, která mimo jiné popisuje rozdělení prostředí do zón z hlediska potřeb astronomického pozorování. V této směrnici se udává, jaký nejvyšší podíl světelného toku do horního poloprostoru může mít každé jedno venkovní svítidlo v dané zóně.

Toto rozdělení je následující:

Tabulka 5-2 Rozdělení prostředí do zón pro astronomická pozorování [14].

Zóna	ULOR [%]	Definice zóny	Příklad zóny	Astronomické využití zóny
E1	0	Oblast se skutečně tmavým prostředím	Národní parky	Observatoře mezinárodního a celostátních významů
E2	≤5	Oblast s nízkými jasy	Venkovské obytné oblasti s nízkými stupni osvětlení komunikací	Postgraduální a akademická studia
E3	≤15	Oblast se středně nízkými jasy	Městské obytné zóny	Studentské práce a amatérská pozorování
E4	≤25	Oblast s vysokými jasy	Městské oblasti se zvýšenou noční aktivitou	Příležitostní pozorování noční oblohy

Jak je z této tabulky patrné, CIE z hlediska eliminace rušivého osvětlení nedoporučuje instalaci svítidel s $ULOR \leq 25\%$, což zcela vylučuje kategorie svítidel C a horší a velkou část svítidel kategorie B (myšleno rozdělení dle DIN 5040). Faktem nicméně zůstává to, že vhodným směřováním světelného toku z venkovních svítidel jsme schopni docílit i ekonomických výhod, jelikož bude účinně využit větší podíl světelného toku svítidla, a tedy i elektrický příkon svítidla bude moci být nižší, což se pozitivně projeví na spotřebované energii danou osvětlovací soustavou.

Dalším možným dělením osvětlovacích soustav je dle použitého světelného zdroje. Tradičně široce zastoupené jsou světelné zdroje s vysokotlakými a nízkotlakými sodíkovými výbojkami (HPS, LPS), postupně vytlačovány a rušeny jsou osvětlovací soustavy využívající jako světelný zdroj vysokotlaké či nízkotlaké rtuťové výbojky. V menší míře jsou zastoupeny i halogenové žárovky, zejména u individuálních osvětlovacích soustav jednotlivých objektů (architektonické osvětlení). Zejména v osvětlovacích soustavách pro průmyslové, komerční či sportovní areály a parkoviště jsou poměrně rozšířené i výbojky metalhalogenidové.

Posledních několik let se do popředí dostávají i světelné zdroje na bázi LED, které jsou dostupné v širokém rozsahu CCT. Jak již bylo řečeno v kapitole 2.1.1 a 2.2, z hlediska rušivého osvětlení je výhodné používat světelné zdroje s nižší CCT, což ze zmíněných kategorií splňují zejména LPS a HPS výbojky, vhodné LED (<2800 K) a halogenové žárovky. U poslední zmíněné kategorie je ovšem díky jejich velmi nízké účinnosti a životnosti nemožné čekat masovější rozšíření pro osvětlování vnějších prostor.

Srovnání světelných zdrojů z hlediska jejich vhodnosti použití pro VO a světelné technických parametrů je uvedeno v tabulce 5-3.

Tabulka 5-3 Porovnání světelných zdrojů vhodných pro veřejné osvětlení [15].

Parametr		Světelný zdroj				
		Kompaktní zářivka	Rtuťová výbojka	Vysokotlaká sodíková výbojka	Halogenidová výbojka	LED
Obvyklé označení		TC-L	HQL, RVE	HST, HSE, HPS	HIT, HIE	HP LED, COB LED
Příkon	P [W]	36 - 80	50 - 400	50 - 250	35 - 250	1 - 250
Světelný tok	Φ [lm]	2 900 - 6 500	1 900 - 22 000	4 000 - 33 000	4 700 - 25 000	100 - 25 000
Měrný výkon	η [lm/W]	80	37 - 57	75 - 130	80 - 100	90 - 150
Doba života, výpadek 10 %	$t_{n90\%}$ [h]	13 000	12 000	10 000 - 22 000	4 000 - 12 000	> 50 000
Doba života, výpadek 50 %	$t_{n50\%}$ [h]	20 000	16 000	25 000 - 35 000	11 000 - 21 000	> 50 000
Pokles Φ po 10 000 h	Z_z [-]	0,85 - 0,97	0,8 - 0,99	0,8 - 0,95	0,55 - 0,80	0,95 - 0,99
Teplota chromatičnosti	T_c [K]	2 700 - 6 500	3 500 - 4 200	2 000	3 000 - 8 500	Téměř libovolná
Barevný tón	-	Teple až chladně bílá	Neutrální bílá	Teple bílá až oranžová	Teple až chladně bílá	Libovolný
Index podání barev	R_a [-]	80 - 90	39 - 56	20 - 25	80 - 90	80 - 99
Výhody		Dobré podání barev, nízké investiční náklady	-	Vysoký měrný výkon, dlouhá doba života	Velmi dobré podání barev	Vysoký měrný výkon, dlouhá doba života, velmi dobré podání barev
Nevýhody		Teplotní závislost Φ , kratší doba života, horší usměrnění Φ	Nízký měrný výkon, horší podání barev, kratší doba života	Nízký index podání barev	Kratší doba života, vyšší investiční náklady	Teplotní závislost technických parametrů
Použití		Obslužné komunikace, rezidenční oblasti, pěší zóny, náměstí	Obslužné komunikace	Všechny typy komunikací mimo komunikací s převažujícím podílem chodců	Pozemní komunikace s převažujícím pohybem chodců, přechody pro chodce	Všechny typy pozemních komunikací

5.2 Regulace a spínání veřejného osvětlení

Této problematice se věnuje zejména norma ČSN 13201. Její první část zmiňuje, že je možné tolerovat snížení osvětlenosti vozovky až o 50 %, ve výjimečných případech i o 75 %. Tato regulace se nesmí provádět vypínáním jednotlivých lamp z důvodu následné špatné rovnoměrnosti osvětlení.

Doporučená metoda je buď použití regulátorů na jednotlivých svítidlech, případně použití svítidel se dvěma světelnými zdroji, z nichž jeden je v provozu jen po omezenou část noci, respektive období, kdy je nutno svítit. Typicky dochází ke snížení výkonu soustav osvětlovací soustavy mezi 23. (případně 24.) večerní a 4. hodinou ranní. Používaná je i centrální transformátorová regulace, kdy v daném časovém úseku dojde ke snížení napájecího napětí dané osvětlovací soustavy [27].

Případné způsoby regulování soustav veřejného osvětlení je třeba přizpůsobovat dané situaci, regulace výkonu není doporučena v oblastech se zvýšenou kriminalitou či jinak rizikových lokalitách, v souladu s generelem a pasportem dané soustavy VO [26]. Regulaci je vhodné použít například při osvětlování pozemních komunikací s malým či žádným pohybem chodců – zde je pak možné přizpůsobovat výkon osvětlovací soustavy i okamžité hustotě provozu.

Zapínání a vypínání veřejného osvětlení je možno řešit buď centrálně, nebo fotobuňkou, registrující intenzitu osvětlení v příslušné oblasti. Přesné hodnoty osvětlenosti pro zapnutí či vypnutí se mezi soustavami, městy a státy mírně liší, ovšem prakticky všude řídicí algoritmus aplikuje na hodnoty snímané intenzity osvětlení určitou hysterezi [26].

6. JAS A JEHO MĚŘENÍ

Jas je fotometrická veličina, již odpovídá radiometrická veličina zář s jednotkou Watt na steradián na metr čtvereční. Pokud chceme měřit a kvantifikovat rušivé osvětlení, konkrétněji tedy jeho projev, tj. závojevý jas oblohy, potřebujeme měřit jas, jelikož na tuto veličinu reaguje lidské oko. Přesněji řečeno, lidské oko reaguje na kontrast jasu, který se určí z jasu pozorované plochy a jasu pozadí [16].

Měření jasu oblohy je poměrně specifické svou (obvykle) malou hodnotu jasu, který měříme a také velkým prostorovým úhlem, který snímáme. Zároveň bychom ale měli být schopni určit i jas jednotlivého bodu, případně menší oblasti.

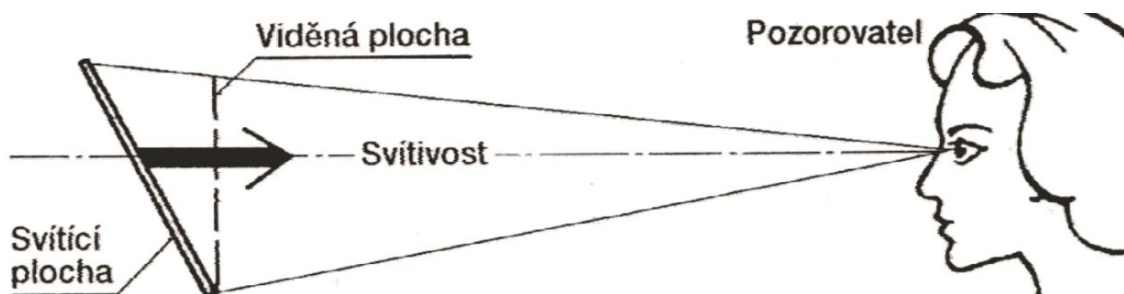
Jas jako takový je určen plošnou a prostorovou hodnotou světelného toku a jako takový je definován jako

$$L = \frac{d^2\varphi}{dA \cdot d\Omega} = \frac{dI}{dA \cdot \cos\alpha} \quad (4a, 4b)$$

kde φ je příslušný světelný tok, dA plocha kolmá k ose světelného svazku a $d\Omega$ prostorový úhel ve steradiánech.

Jednotkou jasu je kandela na metr čtvereční – cdm^{-2} . Starší jednotkou byl nit [nt], který má také význam kandely na metr čtvereční, případně stilb [sb], který odpovídá kandelu na centimetr čtvereční. Stilb se používal v CGS systému jednotek, který předcházel dnešnímu systému SI.

Názornou ilustraci fyzikálního významu jasu můžeme vidět na Obr. 6-1.



Obr. 6-1 Ilustrace veličiny jas. [3]

6.1 Konvenční způsoby měření jasu

Pokud chceme měřit jas, můžeme k tomuto problému přistoupit několika způsoby. Zmíníme si konvenční způsoby měření jasu, tedy přímé měření srovnávacím jasoměrem, nepřímé měření jasu, anebo použití jasového analyzátoru neboli jasové kamery.

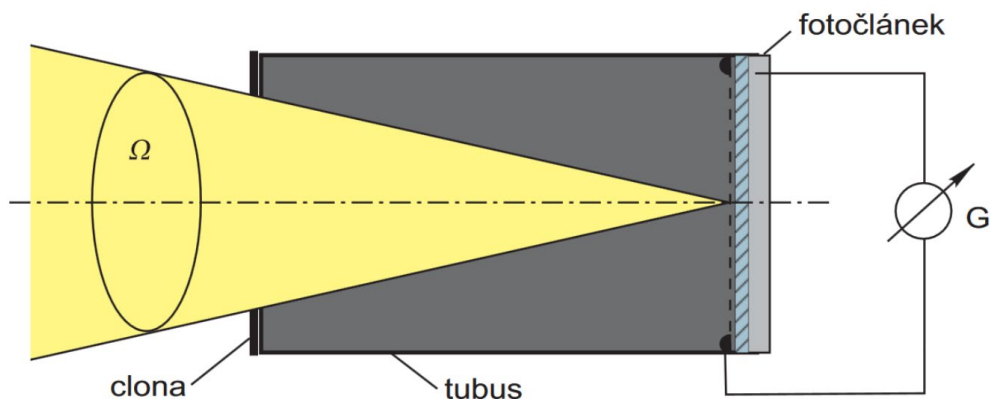
6.1.1 Přímé měření jasu

V případě přímého měření jasu používáme buď jasoměry vizuální či fyzikální. Obě tyto kategorie můžeme navíc ještě rozdělit podle velikosti snímaného prostorového úhlu mezi bodové jasoměry (měří jas velmi malých ploch, tedy snímaný prostorový úhel je velmi malý, řádově jednotky až desítky minut) a integrační jasoměry (měřící jas větších ploch → velký snímaný prostorový úhel, řádově jednotky stupňů).

U vizuálních (neboli subjektivních) jasoměrů je princip jednoduchý, tyto přístroje obsahují regulovatelný světelný zdroj a v jejich zorném poli porovnáváme jas měřené plochy s jasnem kontrolního zdroje.

Měření probíhá tak, že zaměříme přístroj na sledovanou plochu a na cejchované stupnici nastavujeme jas integrovaného světelného zdroje tak, aby se nám měřící a srovnávací pole nerozeznatelně slilo do stejné jasné plochy. Ze stupnice jasoměru poté odečteme hodnotu jasu [17].

Fyzikální neboli objektivní jasoměry obvykle fungují na principu fotočlánku s definovaným zacloněním. Schéma takového jasoměru je uvedeno na Obr 4-2.



Obr. 6-2 Schéma fyzikálního jasoměru. [18]

Clona spolu s tubusem nám definuje prostorový úhel, který „vidí“ fotočlánek, měřící osvětlenost. Střední jas plochy vymezené prostorovým úhlem Ω pak určíme jako

$$L = \frac{E}{\Omega} \quad (5)$$

kde E je fotočlánkem naměřená osvětlenost a Ω prostorový úhel, vymezený clonou.

U všech typů jasoměrů pro přímé měření jasu je třeba bedlivě dbát na to, abychom snímali pouze plochu, kterou skutečně zamýšlíme měřit.

6.1.2 Nepřímé měření jasu

Nepřímé měření jasu využijeme tehdy, není-li k dispozici dedikovaný jasoměr, jelikož k informativnímu či orientačnímu měření stačí pouhý luxmetr. Nejprve si určíme činitel odrazu měřené plochy jako

$$\rho = \frac{E_o}{E_d} \quad (4)$$

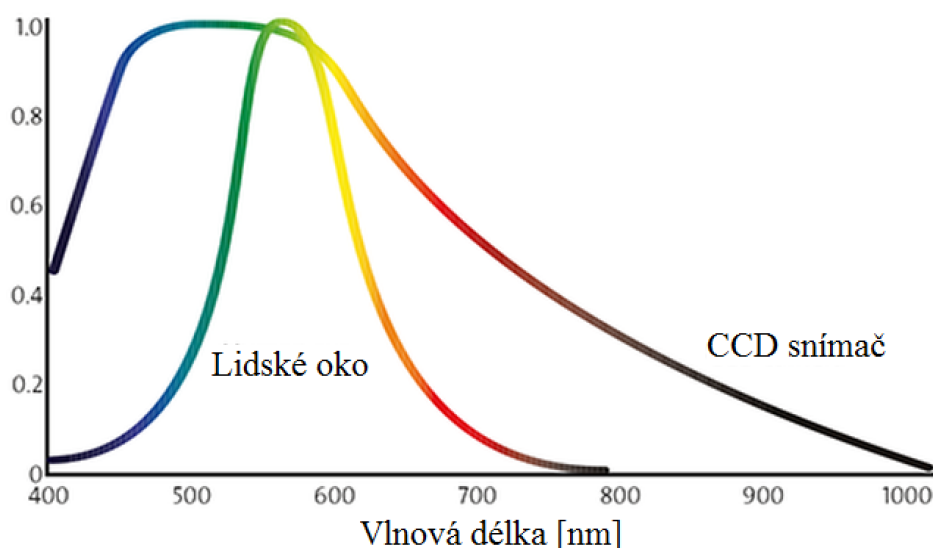
kde osvětlenost E_o je naměřena při poloze fotočlánku směrem k měřené ploše (a to v nejmenší možné vzdálenosti, u které jsme schopni odečíst ustálenou hodnotu, aby se vyloučilo zastínění samotným čidlem) a osvětlenost E_d je změřena při poloze fotočlánku na měřené ploše, tedy směrem ke světelnému zdroji [17]. Poté provedeme samotné měření osvětlenosti pro určení jasu, který určíme podle vztahu

$$L = \frac{\rho * E}{\pi} \quad (5)$$

6.2 Jasové analyzátory

Jasový analyzátor je obecně přístroj, který používá k měření jasů ve scéně upravený digitální fotoaparát nebo obdobný přístroj s CMOS nebo CCD senzorem.

První nutná úprava je kalibrace samotného snímáče na citlivost, odpovídající lidskému oku. Viz Obr. 5-1 – je patrné, že citlivost lidského oka se od CCD snímáče podstatně liší.



Obr. 6-3 Relativní citlivost lidského oka a CCD snímáče. [20, upraveno]

V případě CMOS snímáčů je rozdíl jejich citlivosti vůči lidskému oku ještě markantnější – maximální citlivost tyto snímáče vykazují obvykle v pásmu červené barvy, cca v rozmezí vlnových délek 680–700 nm [21]. Oproti tomu lidské oko vykazuje maximální citlivost na vlnovou délku 555 nm, tedy na zelenou složku světla.

Další nutné úpravy digitálního fotoaparátu už jsou především softwarového charakteru. Pro účely jasové analýzy se obvykle využívá ukládání snímků do formátu RAW, jelikož tak zůstanou zachovány všechny podstatné informace – jde prakticky o neupravený výstup ze snímače, který je pouze zesílen a konvertován A/D převodníkem. Formát TIFF již není vhodný, jelikož zde dochází k úpravě vyvážení bílé a dalších parametrů obrazu, což by výsledky jasové analýzy pochopitelně zkreslilo [22].

Pro samotný výpočet jasu z uloženého snímku potřebujeme znát zejména hodnoty RGB složek, expoziční čas, clonové číslo a ISO [23].

Zjednodušeně řečeno, nejprve musíme kalibrovat digitální fotoaparát tak, aby bylo možno jednoznačně určit citlivostní funkce daného senzoru, použitého ve fotoaparátu. Výsledkem této kalibrace jsou koeficienty pro násobení jednotlivých barevných kanálů RGB a následně je třeba nalezení jejich správné jednotkové lineární kombinace, aby bylo možno určit jas pro každou kompozici. Po této korekci můžeme použít pro určení jasu dvou metodu [60]. První z nich je transformace RGB složek do kanálu Y barevného prostoru CIE XYZ, neboť ten téměř odpovídá křivce $V(\lambda)$ citlivosti lidského oka při fotopickém vidění.

Hodnotu tohoto kanálu určíme jako

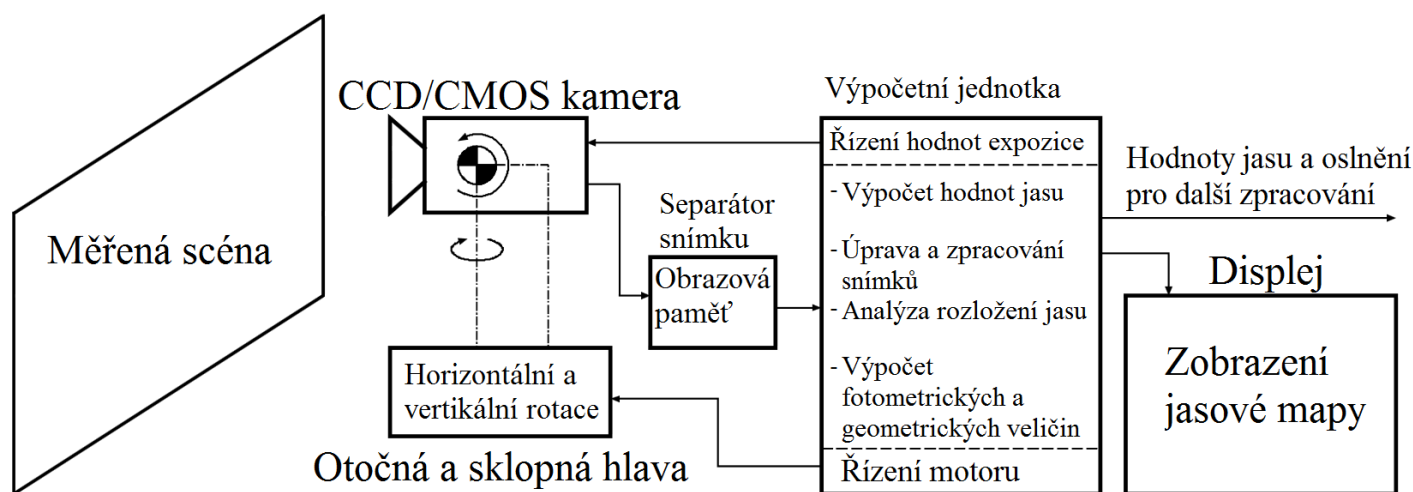
$$Y = 0,21162 \cdot R + 0,7152 \cdot G + 0,0722 \cdot B \quad (6)$$

Druhou možností je výpočet jasu pomocí korekce kalibračního jasu faktorem, který reflektuje aktuální expozici. Pro jas snímané scény pak platí

$$L = L_C \cdot 2^{EV - EV_C} \cdot \frac{ISO_C}{ISO} \quad (7)$$

kde hodnoty s dolním indexem C jsou hodnoty jasu, expozice a citlivosti získané při kalibraci a hodnoty bez indexu jsou hodnoty aktuální scény [60]. Více do hloubky tuto problematiku řeší například [24].

Jedno z možných funkčních uspořádání laboratorního jasového analyzátoru je uvedeno na Obr 5-2.



Obr. 6-4 Jedno z možných uspořádání jasového analyzátoru. [19, upraveno]

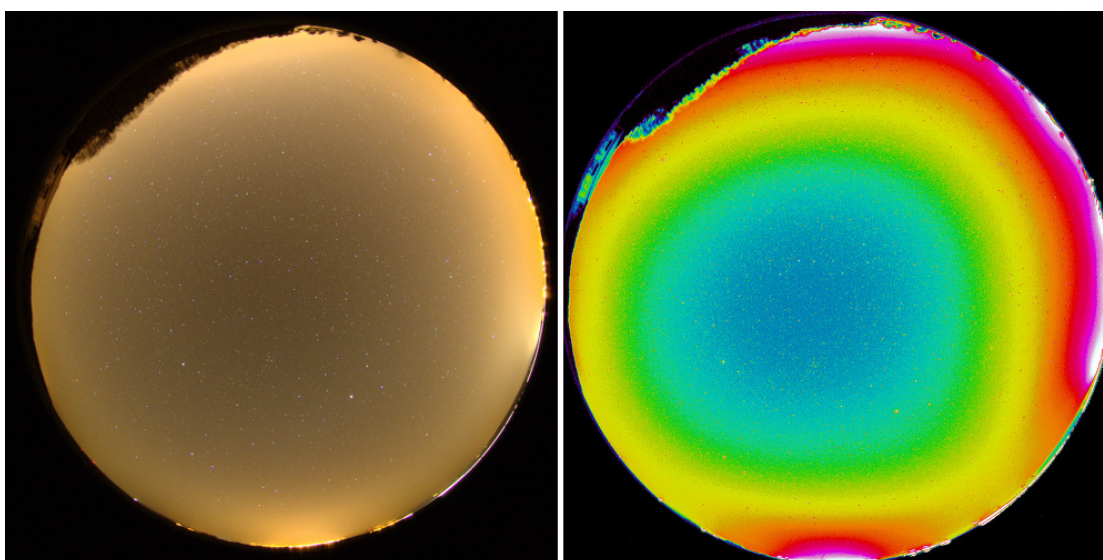
Toto blokové schéma uvádí pouze jeden z možných přístupů k jasové analýze, různé přístroje mohou mít různou topologii, teoreticky si lze vystačit s téměř libovolným digitálním fotoaparátem s korekčním filtrem a upraveným softwarem. Uvedený přístroj je laboratorního charakteru, umístěný na pohyblivém rameni, určený ke stacionárnímu měření například nových typů svítidel. Vedle takovýchto měřících přístrojů existují i kompaktní typy pro terénní měření, které lze použít právě i k určování míry závoje jasů na nočním nebi.

Na trhu jasových analyzátorů existuje několik výrobců, kteří tyto přístroje používají. V první řadě jde o LumiDISP, vyvinutý na ústavu energetiky VUT v Brně, který byl zároveň prvním jasovým analyzátozem v Česku. Dále jsou na trhu přístroje od firmy Techno team z řady LMK, které na rozdíl od LumiDISPu mají úpravu citlivosti snímače provedenou softwarově, což v závislosti na spektru měřeného světla může do měření zanechat velkou chybu. Další firmou, vyvíjející jasové analyzátory je Radiant s jejich řadou PM series [22].

Jasové analyzátory jsou poměrně novým typem měřících přístrojů, které stále procházejí aktivním vývojem. Lze proto očekávat vstup dalších firem na trh tohoto odvětví, stejně tak jako inovace u přístrojů, které se na trhu již vyskytují.

Jasové analyzátory mají oproti konvenčním jasoměrům pro měření rušivého osvětlení řadu výhod. Zásadní výhodou oproti subjektivním či objektivním jasoměrům mají takovou, že zatímco tyto zmíněné přístroje měří pouze jedinou hodnotu pro konkrétní bod či plochu, výstupem měření jasů pomocí jasového analyzátoru je digitální snímek, kde jsme schopni určit jas pro libovolný zachycený bod. Dalším podstatným benefitem je také možnost měřit i velmi malé hodnoty jasů, což je při jasové analýze noční oblohy naprosto zásadní.

Výstupem měření jasovým analyzátozem je tzv. jasová mapa. Příklad je uveden na Obr 6-5. Z jasové mapy jsme schopni odečíst jas libovolného zachyceného bodu.



Obr. 6-5 Zachycený snímek jasovým analyzátozem ve skutečných barvách a jemu příslušící jasová mapa. [25]

Zachycených jasových map jsme poté schopni využít pro zhodnocení rušivého osvětlení v analyzovaném místě, přesněji řečeno takto změříme závojevý jas oblohy spolu s jasnem přírodních nebeských těles.

Mimo zde uvedené měření rušivého osvětlení je pochopitelně možné využít jasové analyzátory i k jiným účelům. Časté využití je pro analýzu dopravních situací, ať už při stavbě nových soustav VO nebo naopak ověření jasových poměrů na místě nehody, kde mohla roli hrát světelná situace.

Stejně tak je výhodné je použít pro analýzu osvětlovacích soustav v interiérech, nejen k analýze jasových poměrů, ale také lze jasové analyzátory s příslušným softwarem využít například k hodnocení vlivu oslnění, respektive přímo ke kalkulaci činitele UGR.

6.2.1 Jasový analyzátor LDA-LumiDISP

Systém pro jasovou analýzu LDA-LumiDISP byl vyvinut na půdě brněnského VUT jako první jasový analyzátor v Česku. Jeho aktuální verze je postavena na bázi digitální jednooké zrcadlovky Nikon D7200. Ta je osazena CMOS snímačem Nikon DX o rozměrech $23,5 \times 15,6$ mm, který má maximální rozlišení 24,2 Mpix. Výstup ze senzoru je následně zpracován 12bitovým A/D převodníkem a poté je vyhodnocen v počítači s nainstalovaným ovládacím software LumiDISP. Dynamický rozsah jasu pro jedno měření je 1 : 1000 a úplný rozsah jasu pro ohniskovou vzdálenost 18 mm je až 1 : 3 200 000 000. Tuto zrcadlovku je možno osadit různými objektivy, v základu typicky objektivem s ohniskovou vzdáleností 50 mm, ale je možno použít i například teleobjektiv či naopak objektiv typu FishEye.

Jasovou kameru je možno ovládat buďto na dálku z počítače, vybaveného příslušným softwarem přes USB připojení, nebo lze používat jako klasický digitální fotoaparát a data se do počítače následně importují z paměťové karty. Výhodou ovládání z PC jsou rozšířené možnosti ovládání, načtení přednastavených sekvencí a podobně, což podstatně zrychluje celé měření.

Samotný software pak umožňuje nejen samotné ovládání měřicího přístroje, ale zejména zpracování naměřených dat. Naměřená sekvence o různých expozičních časech je nejprve převedena na jasové mapy, které je možno dále zpracovávat. Výhodou je možnost sloučení takových snímků do jednoho HDR snímku, který pokrývá široký rozsah jasů. Takto naměřené soubory je možno dále databázově zpracovávat, případně v nich provádět řezy se zobrazením jasu, zobrazovat jejich histogramy či tato data exportovat.

Krom primárního zaměření – měření jasu – lze tento systém využít i k dalším výpočtům, například lze měřit prostorové úhly či při znalostech geometrie určovat i hodnoty osvětlenosti nebo svítivosti. Dále je také možnost přímo počítat činitel oslnění UGR.

Tento měřicí přístroj má možnost uplatnění nejen pro světelné techniky, ale i například pracovníky hygieny, výrobní firmy či vývojová pracoviště [61].

7. MĚŘENÍ JASU NOČNÍ OBLOHY V MĚSTSKÉ AGLOMERACI

Praktická část diplomové práce, ve které probíhalo měření závojevého jasu noční oblohy.

7.1 Postup měření a základního zpracování dat

Před příchodem jasových analyzátorů se pro vyhodnocení závažnosti závojevého jasu oblohy používala zejména vizuální metoda mezní hvězdné velikosti (MHV). Ta spočívala v tom, že se na obloze vymezil určitý obrazec pomocí známých, jasných hvězd (z důvodu opakovatelnosti měření) a následně se spočítají všechny hvězdy uvnitř této oblasti. Z jejich známých hvězdných velikostí (magnitud) se poté pomocí převodních tabulek určí MHV pro příslušnou lokalitu [6, 58].

Alternativou k této metodě je podobná metoda Bortleovy stupnice, kdy se opět využívá viditelnosti určitých známých objektů na nočním nebi a pomocí jejich viditelnosti či neviditelnosti se pozorovaná situace zařadí na devítistupňovou škálu vlivu závojevého jasu oblohy [59].

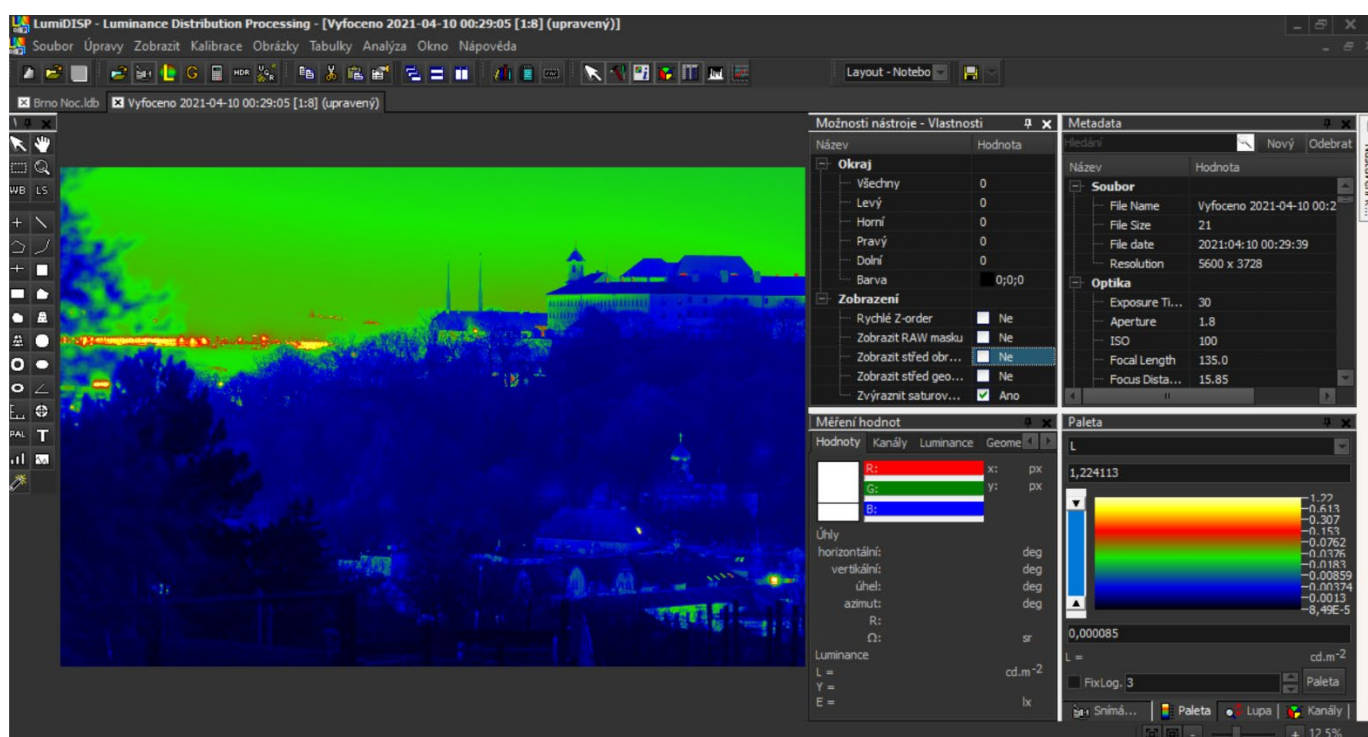
Moderní měřicí metodou závojevého jasu oblohy je ovšem využití jasového analyzátoru. V tomto konkrétním případě byl pro měření použit systém LDA – LumiDISP.

Jako primární místo pro měření bylo vybráno malé parkoviště na ulici Kraví hora (nad areálem plaveckého bazénu Koupaliště Kraví hora). Tato lokalita byla vybrána zejména z důvodu její vyvýšené polohy, která skýtá poměrně dobrý výhled, a to přibližně od azimutu 135° až po azimut 290° . Primárně je odtud dobrý výhled na Masarykovu čtvrť, ale také částečně na Staré Brno, hrad Špilberk, Brno – Štýřice, Brno-jih, Horní Heršpice a Modřice, tedy jihozápadním směrem. Dalšími důvody pro výběr této lokality byla absence blízkých lamp VO, které by měření rušily, a také dobrá dopravní dostupnost lokality. Navíc se jednalo o slepou ulici s prakticky nulovou frekvencí motorového provozu, tedy nehrozilo ani přílišné ovlivnění měření světlomety projíždějících automobilů. Určitou nevýhodu na lokalitě představoval masiv Žlutého kopce, který limitoval daleký výhled západním směrem.

Měřicí sestava se skládala z pro měření jasu upravené digitální zrcadlovky Nikon D7500 na stativu zn. Hama, ovládané přes USB rozhraní z notebooku Lenovo ThinkPad X390 Yoga, který byl vybaven softwarem LumiDISP verze 3.0.0.31. Měření probíhalo se dvěma objektivy, a to Sigma 4.5 mm F2.8 EX DC HSM Circular Fisheye, tedy širokoúhlý objektiv typu „rybí oko“ s pevnou ohniskovou vzdáleností, a Sigma 135 mm F1.8 DG HSM Art, což je portrétní objektiv, taktéž s pevným ohniskem. Tato kombinace dvou objektivů nám dovoluje jednak jedním snímkem pokrýt celou oblohu (v případě rybího oka), nebo naopak zachytit pouze menší detail horizontu, oblohy či jiné zájmové oblasti (v případě portrétního objektivu).

Postup měření byl následující: Nejprve bylo tělo zrcadlovky osazeno objektivem, který vyhovoval zamýšlenému měření. Poté byl přístroj připevněn ke stativu, došlo k připojení USB kabelu, přístroj byl zapnut a celá sestava byla namířena směrem, který odpovídal zájmové oblasti.

Na notebooku, ke kterému byl připojen USB kabel, byl spuštěn program LumiDISP a došlo k iniciaci komunikace mezi zrcadlovkou a notebookem. Po spuštění funkce LiveView v ovládacím programu (tlačítko LV) se na obrazovce notebooku ukázal obraz, snímáný jasovým analyzátořem a došlo k zaostření obrazu na zájmovou oblast. Pokud funkce automatického ostření z nějakého důvodu nefungovala správně, bylo vždy možné přepnout na objektivu z automatického na manuální ostření a obraz zaostřit ručně ostřicí prstencem, umístěným na objektivu.



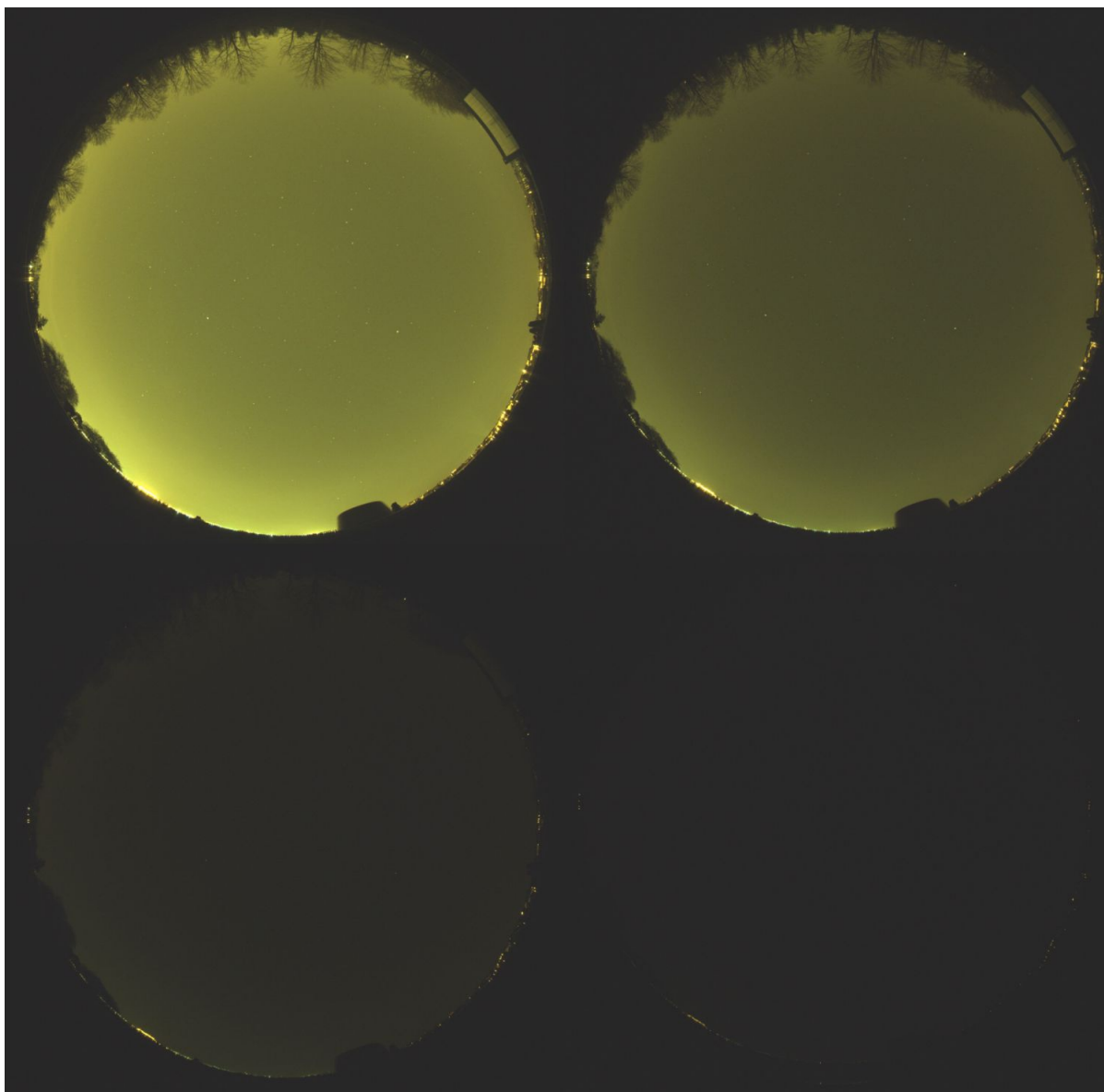
Obr. 7-1 Prostředí programu LumiDISP.

V programu byla poté vybrána vhodná sekvence pro HDR snímání s expozičními časy, které odpovídaly světelným podmínkám snímání scény a snímání bylo spuštěno (tlačítkem „Snímat do databáze“).

Jelikož rozsah jasů drtivě většiny měřených scén převyšuje maximální dynamický rozsah jasového analyzátořu 1:1000, je nutné snímání provádět formou sekvence snímků s rozdílnou dobou expozice a následně je sloučit do jednoho HDR snímku, již s mnohem větším rozsahem jasů (expoziční bracketing). Všechny ostatní parametry (ISO, clona, ostřicí vzdálenost...) musejí v rámci jedné sekvence zůstat stejné. Při snímání jasových map byly použity časy expozice od 30 do 1/8000 sekundy, ovšem pro tmavé až velmi tmavé oblohy by bylo třeba použít časů ještě delších – jednu až dvě minuty.

Potřebné časy expozic se pochopitelně krom světelných podmínek snímané scény odvíjejí především od světelnosti objektivu. Pro snímání jasových map během dne, a tedy i s dostatkem světla stačí expoziční časy mnohem kratší.

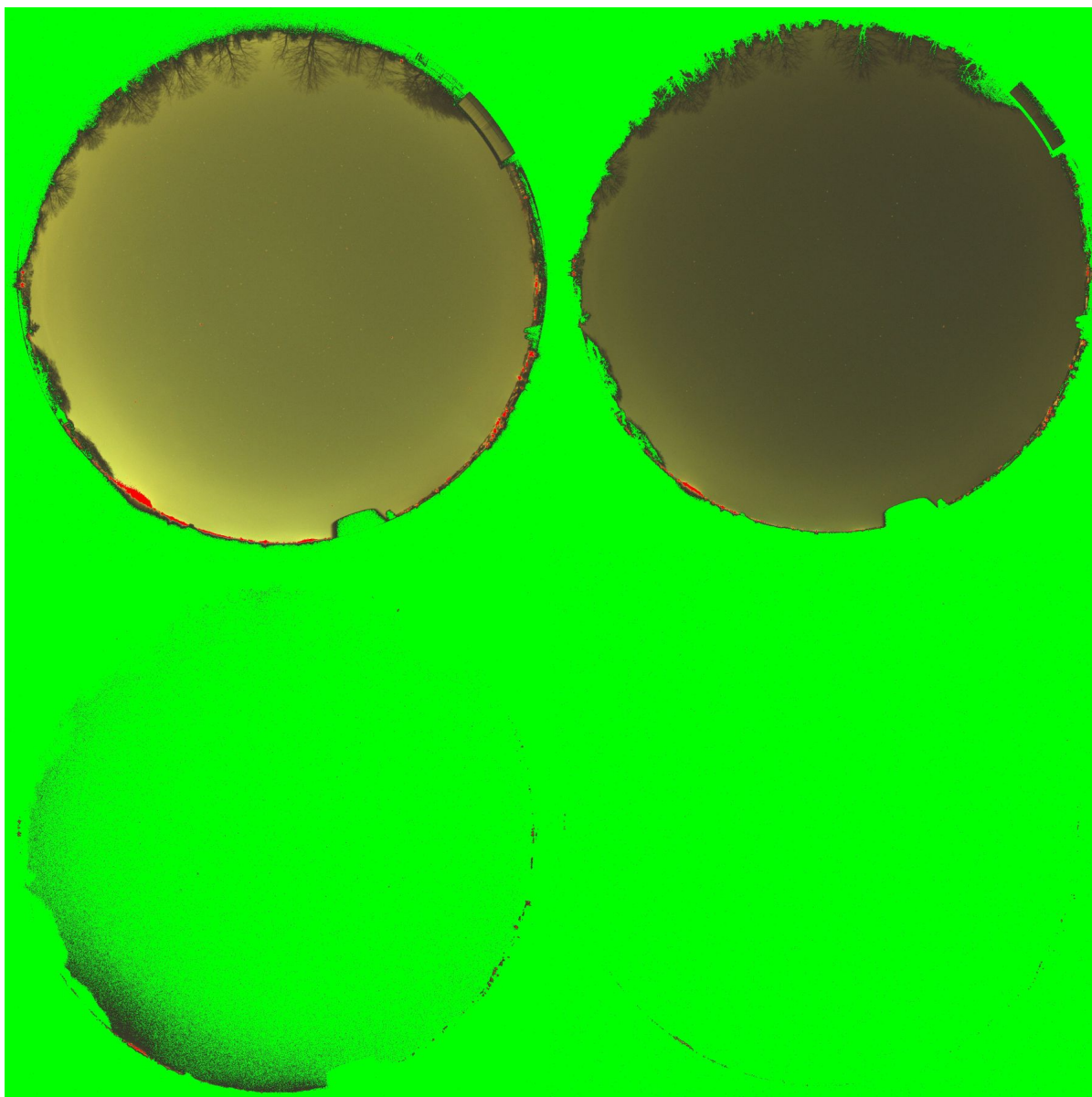
Význam HDR snímkování je zdůrazněn níže. Uvedené snímky byly pořízeny s expozičními časy 30 s, 10 s, 1 s, 0,1 s.



Obr. 7-2 Snímky noční oblohy s různým expozičním časem.

Tyto snímky byly pořízeny se širokoúhlým objektivem typu rybí oko, namířeným přímo do zenitu. Citlivost ISO zde byla nastavena na hodnotu 10000 a světelnost na maximální hodnotu F2.8. Program LumiDISP přímo disponuje funkcí, která zvýrazňuje podexponovaná a přexponovaná místa, tedy je možné podle těchto informací upravit expoziční časy tak, aby byl pokryt skutečně celý rozsah jasů, které se v dané scéně vyskytují.

Pokud uvedené čtyři snímky podrobíme zmíněné analýze, obdržíme následující výsledek:

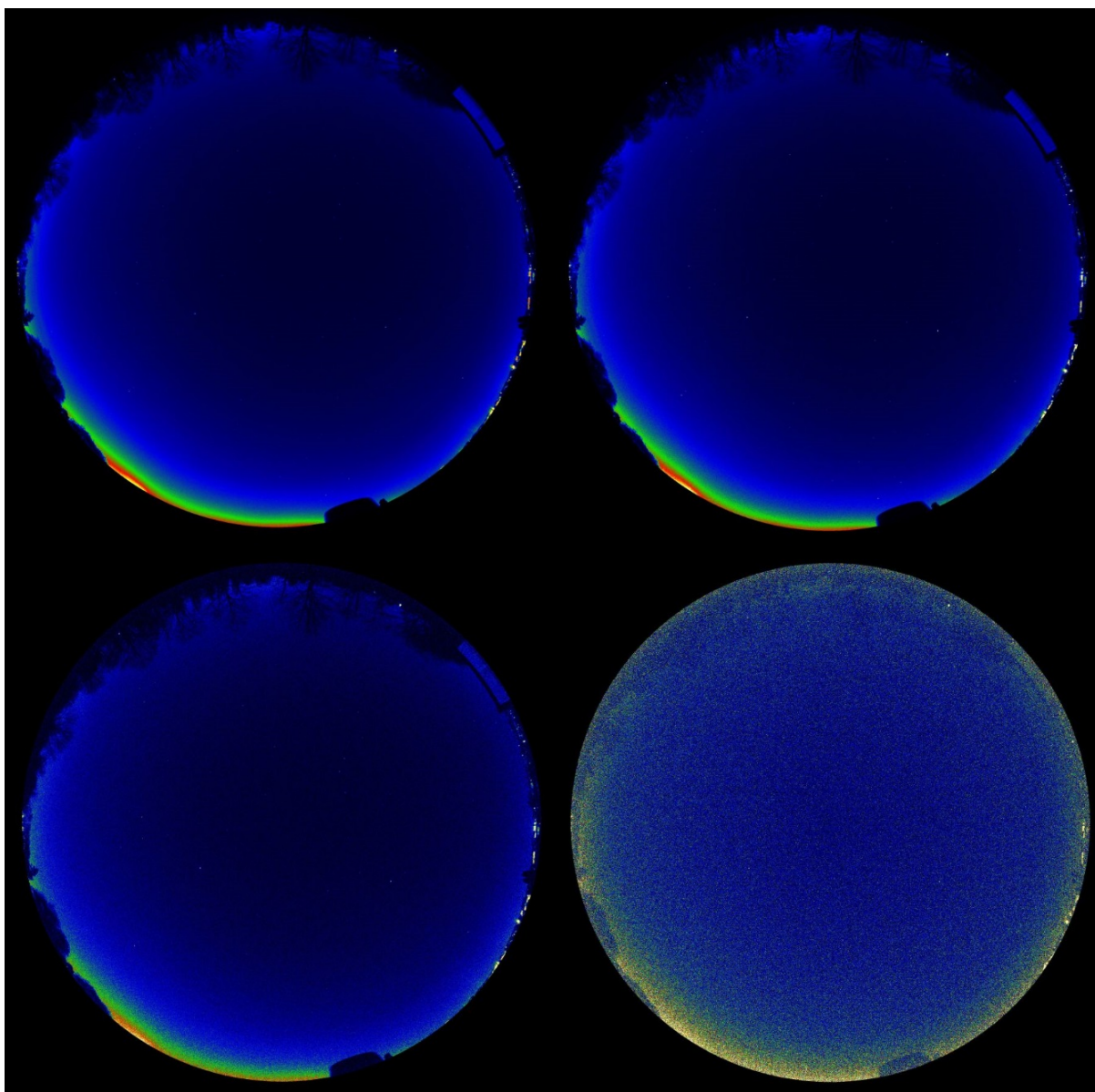


Obr. 7-3 Analýza expozice sekvence snímků.

Červené oblasti jsou přexponované, zelené podexponované. Oblasti s vhodným expozičním časem jsou beze změny. Z obrázku 7-3 je patrné, že zvolená sekvence expozičních časů byla pro danou situaci zvolena správně, jelikož všechny jasy oblohy v oblasti se povedlo pokrýt (žádná relevantní oblast není na všech snímcích přexponovaná, nebo naopak podexponovaná). Terén, který je podexponován na všech snímcích, nám není k úhonně, jelikož provádíme pouze analýzu jasů oblohy.

Také je zde patrné, že kratší expoziční časy (1 s; 0,1 s) pokryly skutečně jen oblasti, které byly na obrázku velmi světlé (relativně ke zbytku scény).

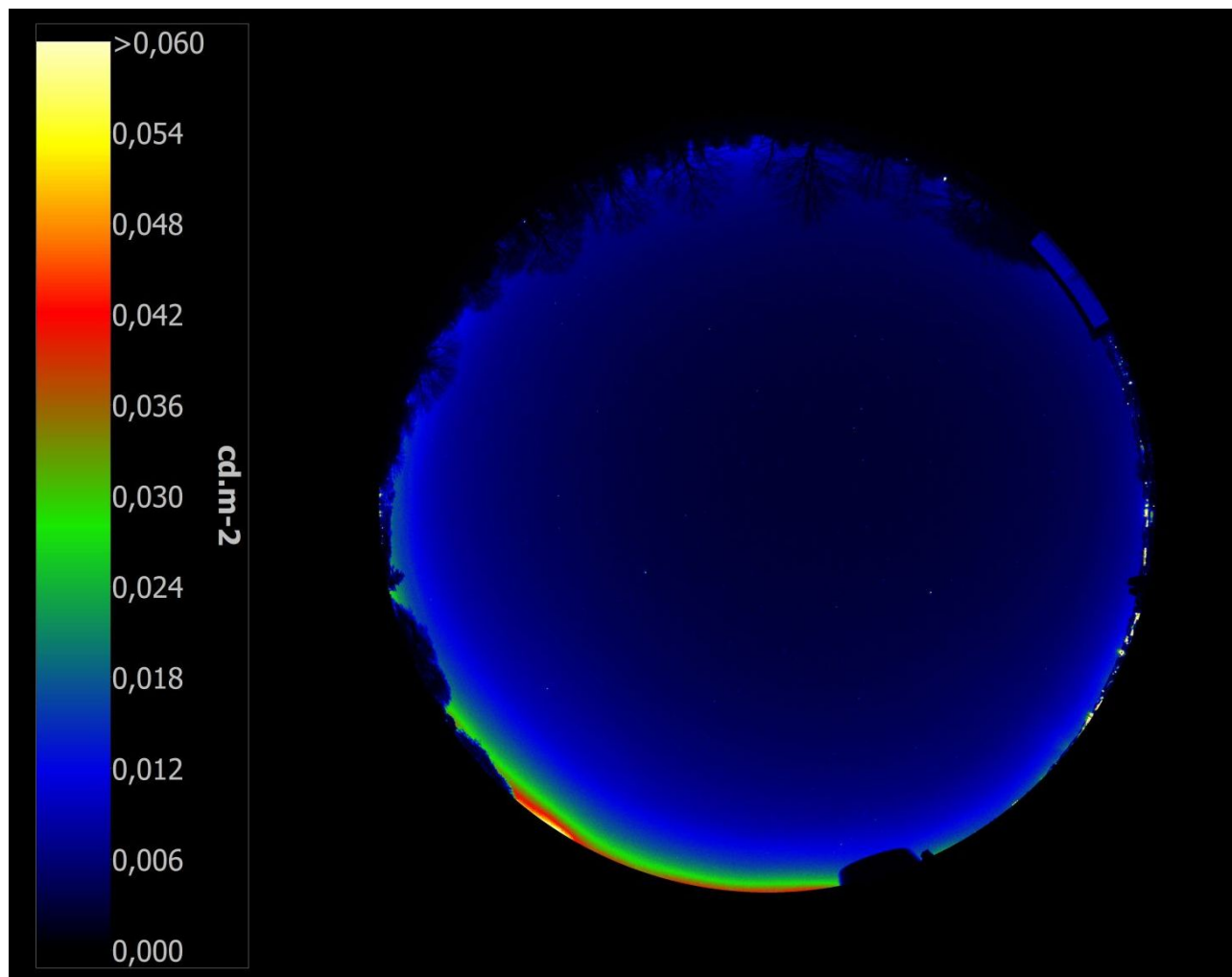
Nyní můžeme již přistoupit k jasové analýze jednotlivých snímků, která je tedy zatím pouze dílčí krok k dosažení finálního výsledku.



Obr. 7-4 Snímky sekvence, převedené do jasových map.

Zde již dostáváme jasové mapy pro jednotlivé snímky sekvence. Pro delší expoziční časy jsou světlejší oblasti oblohy přexponované (a tedy by zde nebylo korektně možno určit jas), pro kratší expoziční časy je naopak patrné, že až na nejsvětlejší oblasti nedochází ke správnému určení jasů v daném snímku. (Dlužno podotknout, že v tomto bodě to ani není možno očekávat, v uvedeném případě je expoziční čas 0,1 s zahrnut pouze z důvodu velmi malých světlých oblastí zejména v levém dolním kvadrantu snímané scény.)

V tomto bodě jsme tedy již schopni vytvořit HDR snímek pro danou scénu, který pokrývá celý rozsah jasů zájmové oblasti, k čemuž (nepřekvapivě) využijeme funkci HDR.



Obr. 7-5 Výsledný HDR snímek snímané scény.

Tuto jasovou mapu je již možno považovat za výsledek celého snímání dané scény. Z obrázku 7-5 je patrné, že skutečně došlo ke korektnímu nasnímání měřené scény a následné úpravě a spojení jednotlivých snímků. V prostředí programu si je tedy v této chvíli již možné určit si jas libovolného bodu na obloze.

Do jasové mapy byla pro přehlednost vložena i barevná legenda naměřených jasů, která má význam především pro export snímků mimo prostředí programu.

Program LumiDISP obsahuje taktéž editační menu s poměrně rozsáhlými možnostmi úprav pořízených snímků a jasových map. V tomto režimu je možné otevřít si libovolný snímek či naměřený výsledek, a následně jej zpracovávat či upravovat.

7.2 Analýza a vyhodnocení naměřených dat

V rámci měření bylo nasnímáno větší množství snímků, z nichž zde budou uvedeny jen ty podstatné pro demonstraci vybrané vyhodnocovací metody.

Přesná metodika tohoto hodnocení ještě není příliš ustanovena, v úvahu podle [23] připadají například jasové profily ve vybraných řezech jasovou mapou, gradace jasu na určité křivce, jas zenitu v určitém zorném úhlu, jas horizontu v určitých směrech či poměr světlé a tmavé části oblohy.

Pokud chceme vyhodnocovat stupeň závažnosti závoje jas oblohy, nabízí se zejména přístup srovnávání takto naměřených jasů s oblohou rušivým osvětlením nezátíženou. Přirozený jas oblohy (v zenitu, během astronomické noci) v oblasti bez jakéhokoliv rušivého osvětlení je přibližně $0,25 \text{ mcdm}^{-2}$. Při takovém jasu oblohy je možno pouhým okem spatřit na hvězdném nebi přibližně 6500 hvězd, do magnitudy cca 6,8 a méně [62]. Toto odpovídá stupni 1 na Bortleho stupnici.

Jakýkoliv zdroj rušivého osvětlení způsobí, že se tento jas podstatně zvýší, v případech velkých městských aglomerací až stonásobně (a teoreticky i více).

Jako finální měřicí a vyhodnocovací metoda pro určení stupně závoje jas oblohy bylo nakonec zvoleno následující: Jasový analyzátor bude vybaven širokoúhlým objektivem typu „rybí oko“ a upevněn na stativ tak, aby mířil přímo do zenitu (nadhlavníku), čímž bude zajištěno snímání celé oblohy. Podle světelných podmínek v místě měření bude nastavena sekvence snímání tak, aby byly správně naexponované všechny podstatné plochy (v úvahu pro běžnou noc připadají například expoziční časy 60 s, 30 s, 10 s, 1 s, 0,1 s, 0,01 s) a daná sekvence bude nasnímána.

Poté se v programu LumiDISP všechny snímky sekvence převedou na jasové mapy a následně budou sloučeny do jednoho HDR snímku. Tím bude zaručena možnost korektně odečíst jas pro všechny části oblohy. Následně se na do jasové mapy vloží detektor jasu tvaru kružnice o zorném úhlu 120° , jež bude jako výsledek poskytovat průměr jasů v dané kružnici.

Takto určený jas se poté dá do poměru s přirozeným jasnem oblohy bez závoje jas, tvořeného světlem umělých zdrojů. Jako tato vztažná hodnota byla dle [62] určena velikost jasu $0,25 \text{ mcdm}^{-2}$, tedy $25 \cdot 10^{-5} \text{ cdm}^{-2}$. Výsledkem tohoto výpočtu bude tedy bezrozměrný činitel, který nám bude říkat, kolikrát větší je jas podstatné části oblohy oproti přirozenému jasu bez vlivu rušivého osvětlení.

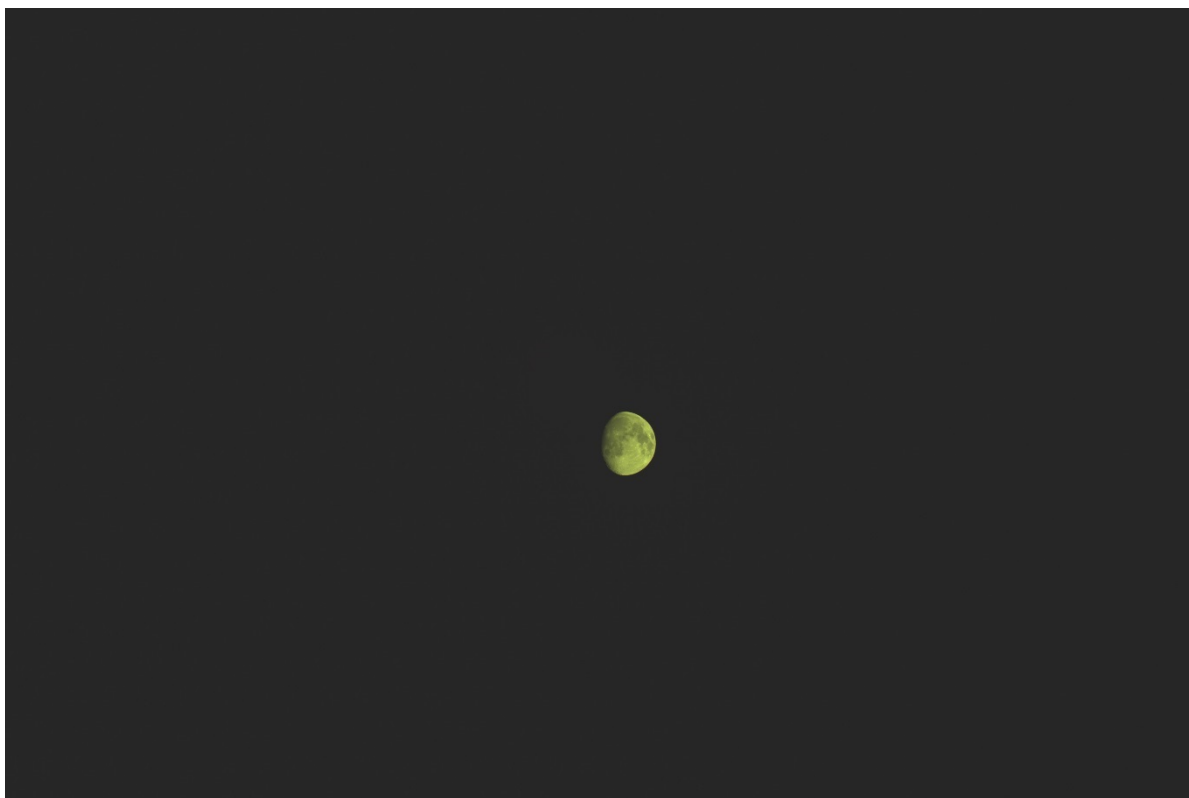
Hodnota zorného úhlu 120° byla vybrána tak, aby došlo k určité eliminaci vyšších jasů poblíž horizontu, které se do určité míry vyskytuje i v přirozené, světlem nerušené krajině. Také bude tímto eliminován vliv přímo vyzařujících umělých světelných zdrojů, nacházejících se poblíž horizontu, které by měření v případě zorného úhlu například celých 180° podstatně ovlivnily.

Tato metoda vyhodnocení by měla poskytovat v zásadě opakovatelné výsledky měření a vyhodnocování, ovšem má jednu zásadní nevýhodu, a tou je fakt, že zde není provedena jakákoliv korekce vlivu Měsíce. Pokud by se Měsíc (v prakticky libovolné fázi, vyjma novu) nacházel na vyhodnocované ploše, zásadně by ovlivnil výsledný

průměrný jas zkoumané části oblohy a tím naprosto narušil měření. Pokud by se Měsíc nacházel na obloze, ale pod zorným úhlem mezi 120° a 180° , k určitému ovlivnění měření by také došlo, ale v případě právě vycházejícího Měsíce či Měsíce skutečně nízko nad obzorem by takováto chyba byla nejspíš ještě v řádu desetin či jednotek procent, a tedy do určité míry zanedbatelná. Optimální čas na měření je tedy v době, kdy je Měsíc v novoluní, díky čemuž by bylo možné toto měření provádět libovolně během celé astronomické noci).

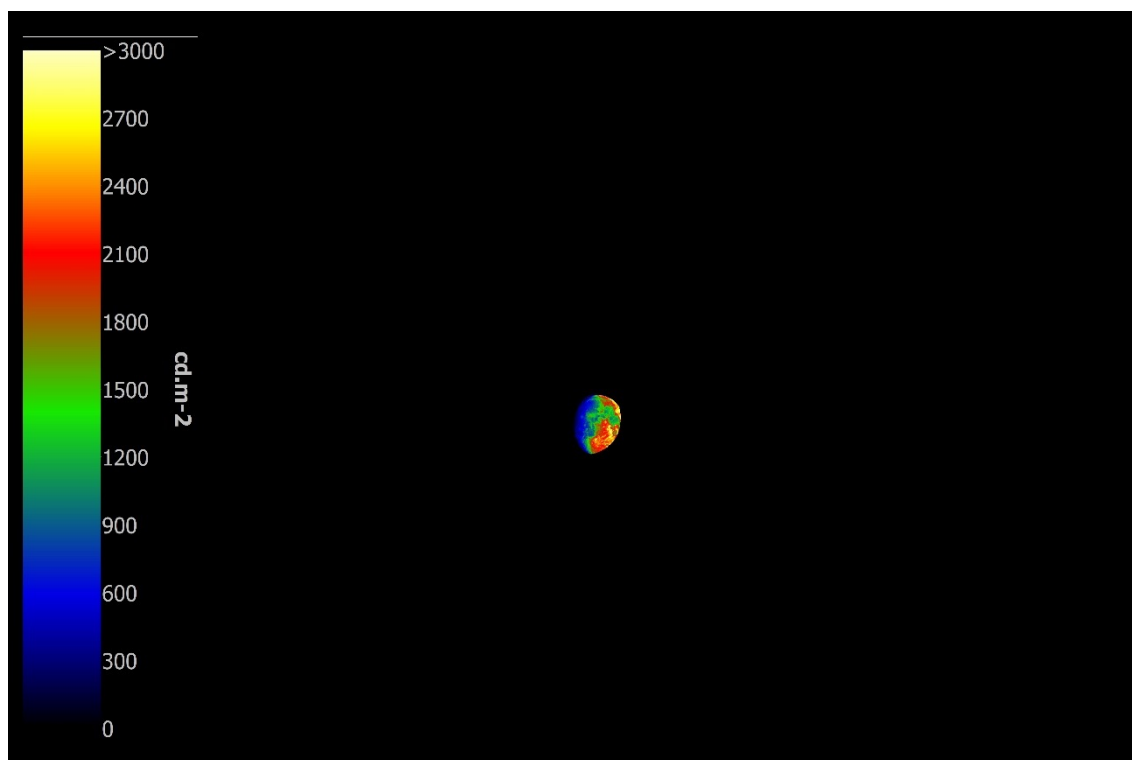
Poloha jiných nebeských těles by měření ovlivnit příliš neměla (samozřejmě vyjma Slunce, které musí být dostatečně nízko pod horizontem tak, aby neosvětlovalo vyšší vrstvy atmosféry – měření musí být tedy provedeno během astronomické noci). S neobvyklými atmosférickými či vesmírnými jevy (polární záře, bolidy, komety...) tato metoda nijak nepočítá.

Vliv Měsíce na jas oblohy kolem něj byl do určité míry určen zde. Objektívem s ohniskovou vzdáleností 135 mm byla za jasné noci pořízena sekvence snímků Měsíce během fáze dorůstání:

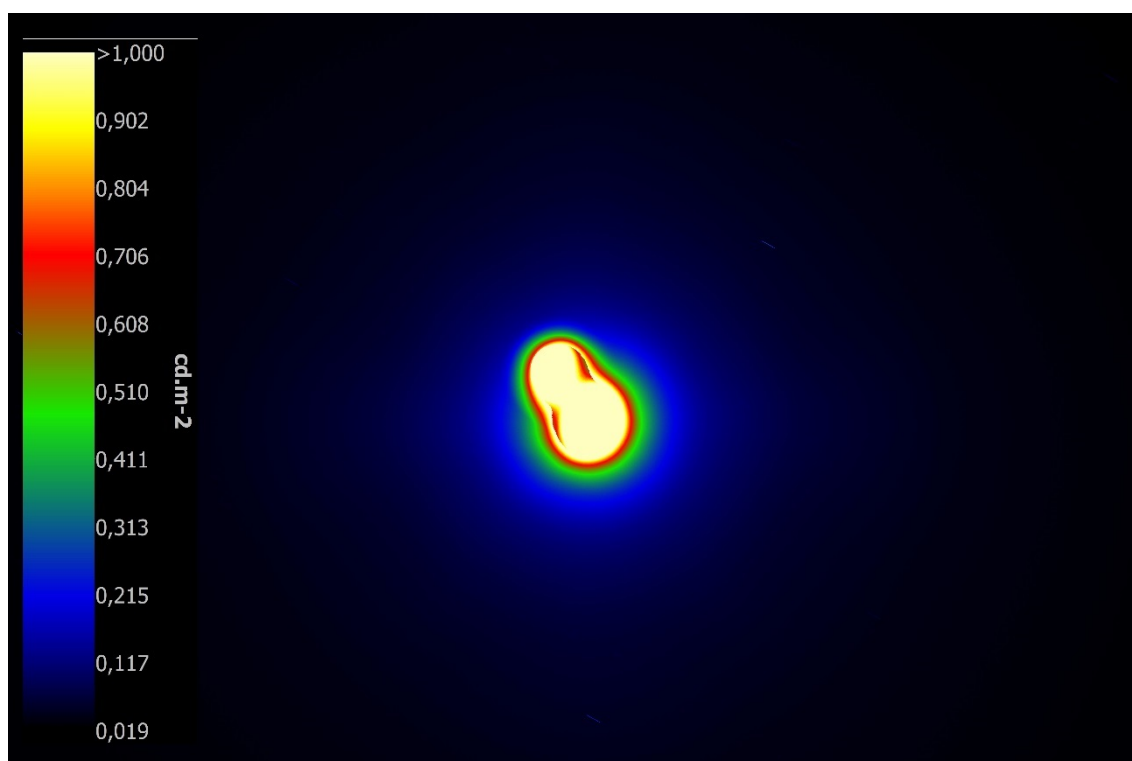


Obr. 7-6 Zkoumaný snímek Měsíce (Autor: Petr Baxant).

Daná sekvence byla následně převedena na jasové mapy a ty poté sloučeny do jednoho HDR snímku. Vzhledem k příliš velkému rozsahu jasů na této fotografii byla jasová mapa vyexportována dvakrát, pokaždé s jinak nastaveným rozsahem palety.



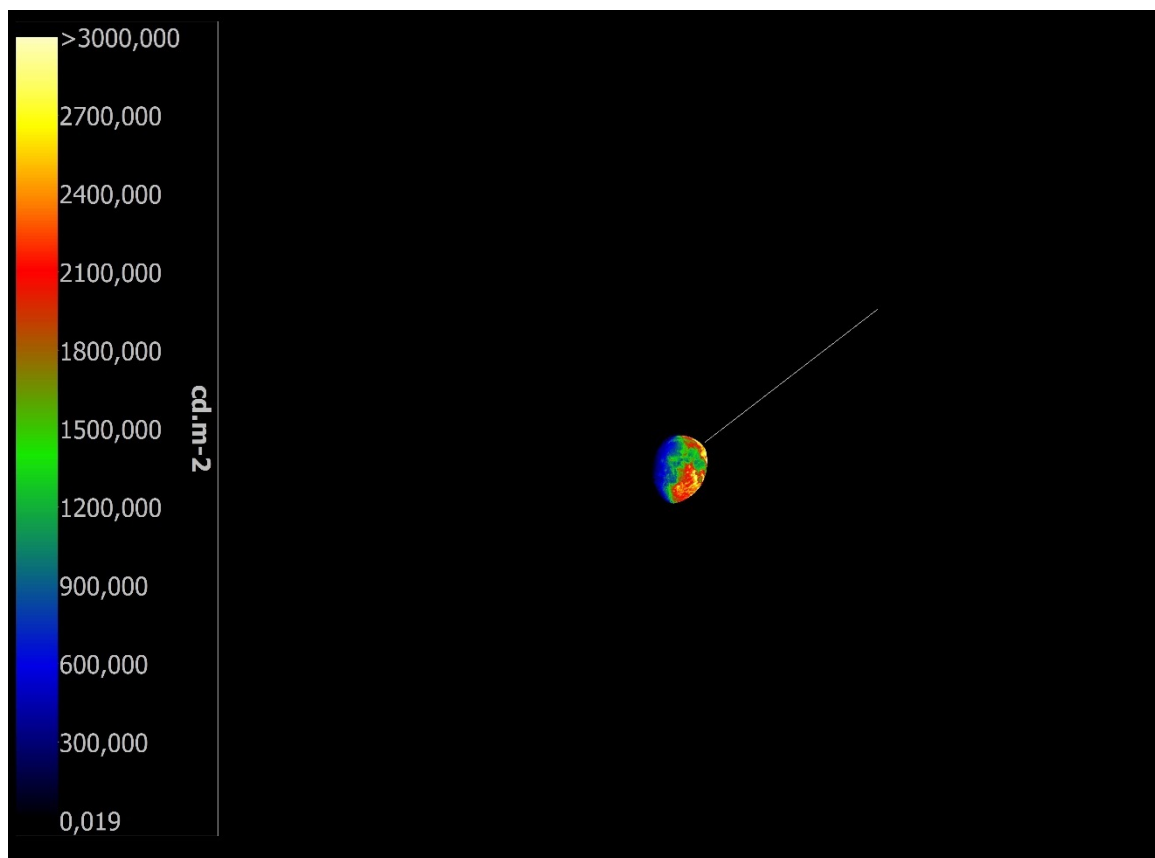
Obr. 7-7 Jasová mapa Měsíce v rozsahu 0–3000 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$.



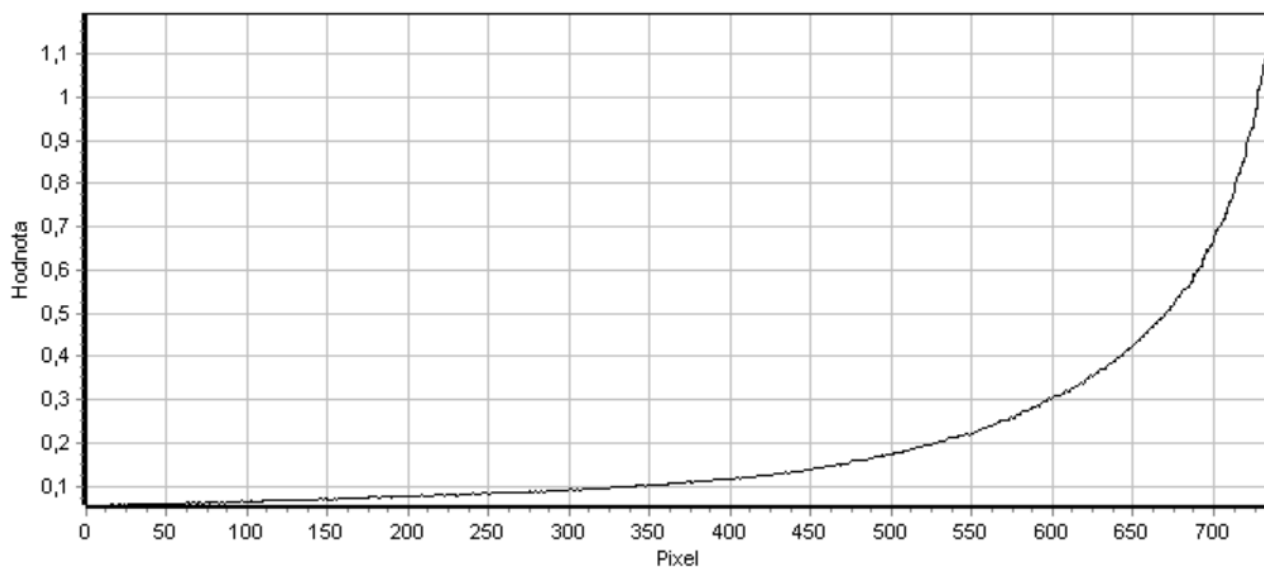
Obr. 7-8 Jasová mapa Měsíce v rozsahu 0–1 $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$.

Parazitický kulatý útvar v levé horní části Měsíce je odlesk čoček objektivu (lens flare), jedná se tedy prakticky o chybu měření, která ovšem na výsledek nemá přílišný vliv.

Od měsíčního kotouče směrem do pravého horního rohu snímku byl veden řez, po jehož délce byl snímán jas oblastí jasové mapy, kterými procházel.



Obr. 7-9 Jasová mapa Měsíce se zkušebním řezem.

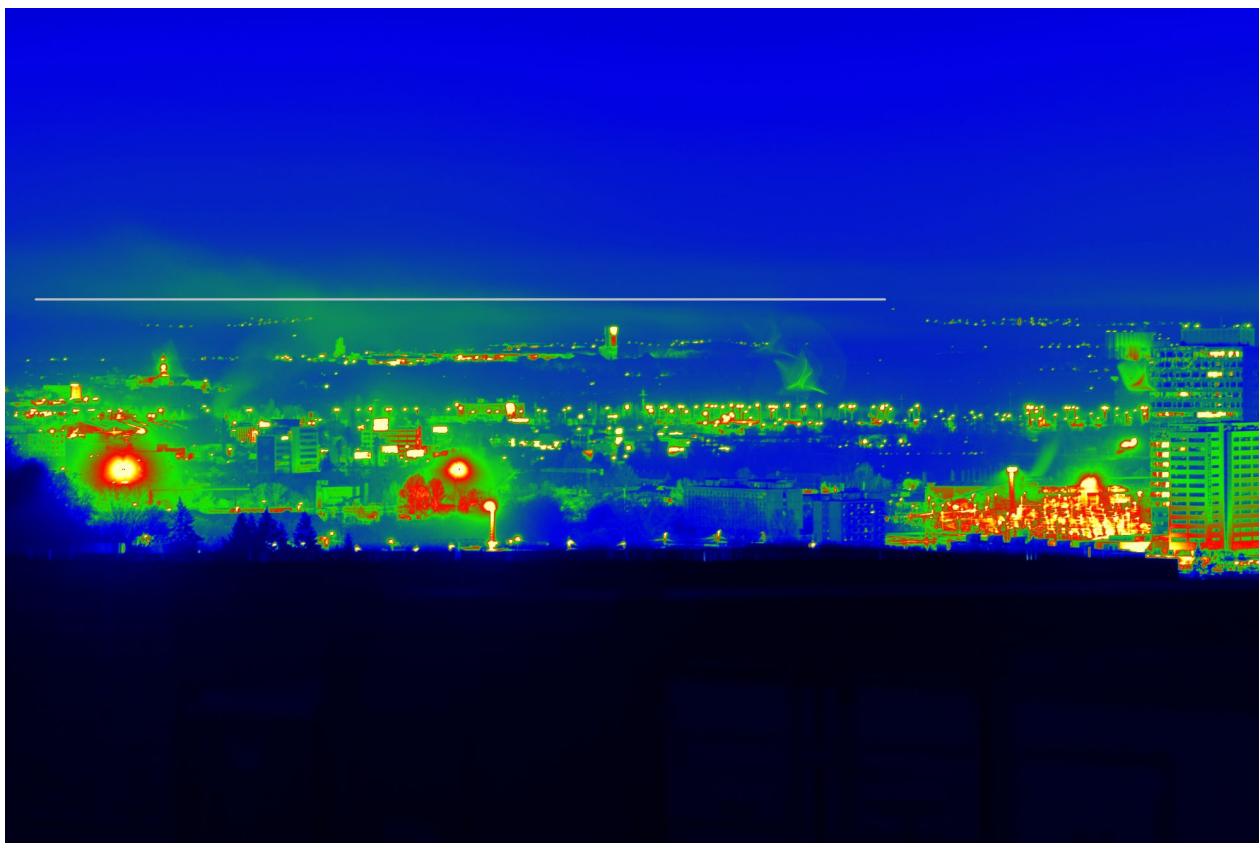


Obr. 7-10 Jasy na průběhu řezu z blízkosti Měsíce. Osa Y v cdm^{-2} .

Z grafu na obrázku 7-10 (a prakticky i na obrázku 7-8) je patrné, že jas oblohy v okolí Měsíce klesá s rostoucí vzdáleností od měsíčního kotouče dle očekávání exponenciálně. Díky této závislosti je možné tvrdit, že při dostatečné vzdálenosti Měsíce od měřené kružnice (vytyčené úhlem 120°) je možné jeho vliv na měření závojevého jasu zanedbat. Přesnou definici „dostatečné vzdálenosti“, respektive spíše „dostatečného rozdílu zorných úhlů“ bude nutno ověřit experimentálně v dalším vývoji této měřicí metodiky.

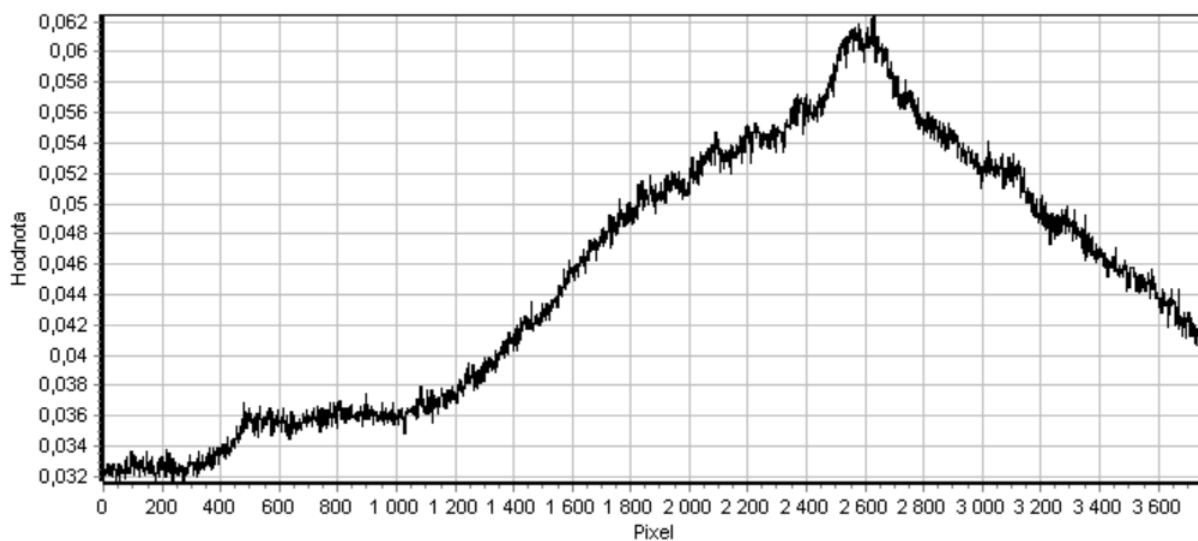
Vliv na výsledný naměřený průměrný zenitový jas bude mít bezpochyby i počasí v místě měření. Jakákoliv oblačnost či mlha bude totiž nasvícena světlem umělých světelných zdrojů, a tím tedy bude závojevý jas oblohy vycházet pochopitelně vyšší. Je otázkou pro následující výzkum a vývoj této problematiky, jakým způsobem faktor počasí do výsledného koeficientu zahrnout, jelikož i když se ve všech případech jedná o skutečně naměřený závojevý jas oblohy, zhoršuje to poté porovnatelnost výsledků a opakovatelnost měření.

Jako příklad vlivu nízké oblačnosti či mlhy, nechť slouží následující jasová mapa:



Obr. 7-11 Jasová mapa s vlivem mlhy.

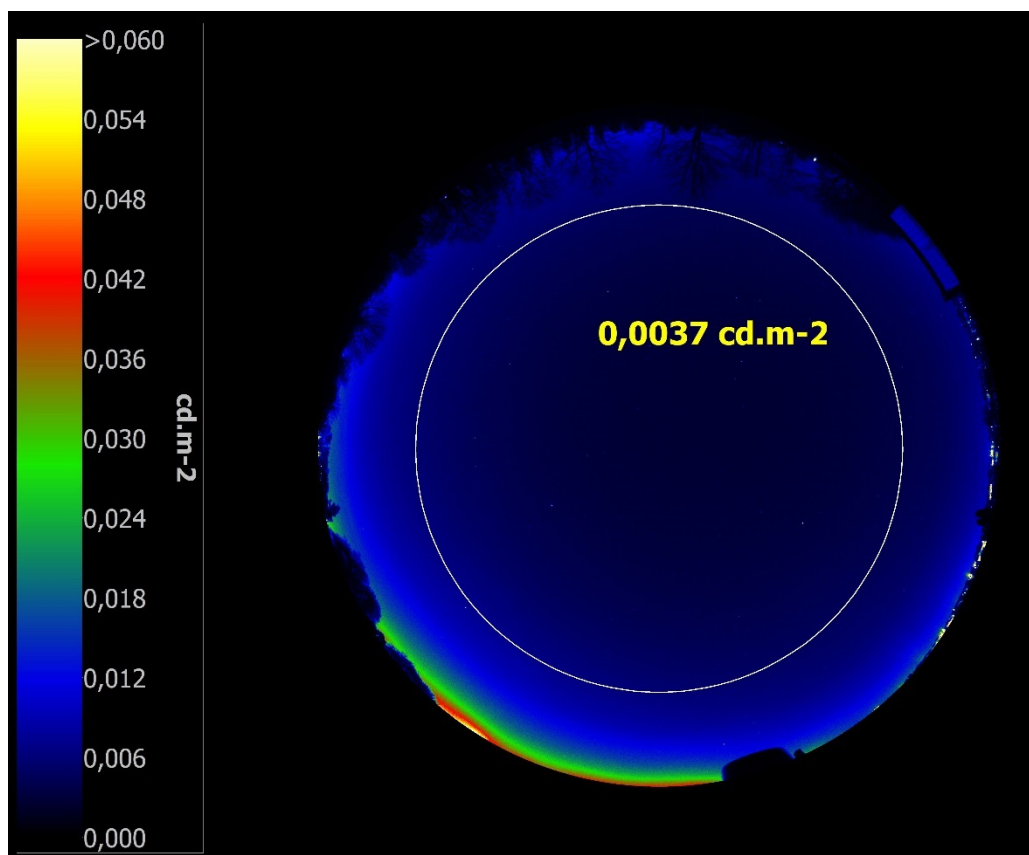
Oblast vodní páry je na jasové mapě zřetelně vidět zelenou barvou proti modrému pozadí. V této zájmové oblasti byl tedy proveden řez, zachycující vliv vodní páry na naměřený jas.



Obr. 7-12 Průběh jasů na řezu oblastí mlhy. Osa Y v $\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$.

Je zde jasně patrné, že v oblasti nejhustější mlhy je jas oproti pozadí téměř dvojnásobný. Měsíc a případná oblačnost jsou patrně nejdůležitější faktory, které mohou ovlivnit výsledek měření stupně závojového jasu oblohy.

Aplikací navržené metody hodnocení závojového jasu oblohy dostaneme pro několik příkladů následující hodnoty:



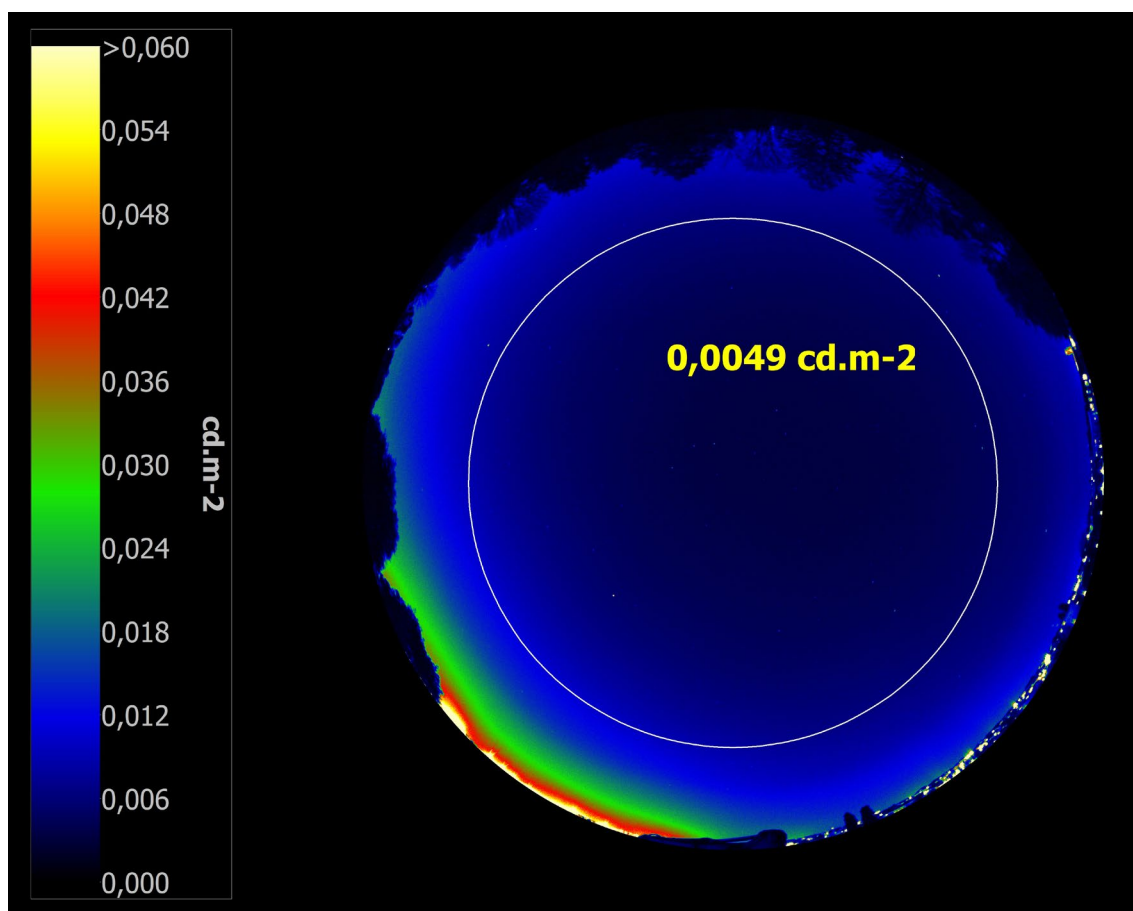
Obr. 7-13 Analyzovaný snímek zenitu 1.

Pro uvedený snímek zenitu dostáváme tedy pro zorný úhel 120° průměrný jas $3,7 \text{ mcdm}^{-2}$. V souladu s navrženou metodikou tedy určíme stupeň závoje jasů jako

$$k_{zJ} = \frac{L_\phi}{L_N} = \frac{3,7}{0,25} = 14,8$$

Naměřený jas určené oblasti je tedy téměř patnáctinásobný oproti obloze bez rušivého osvětlení.

Aplikujme tento algoritmus na další jasovou mapu:



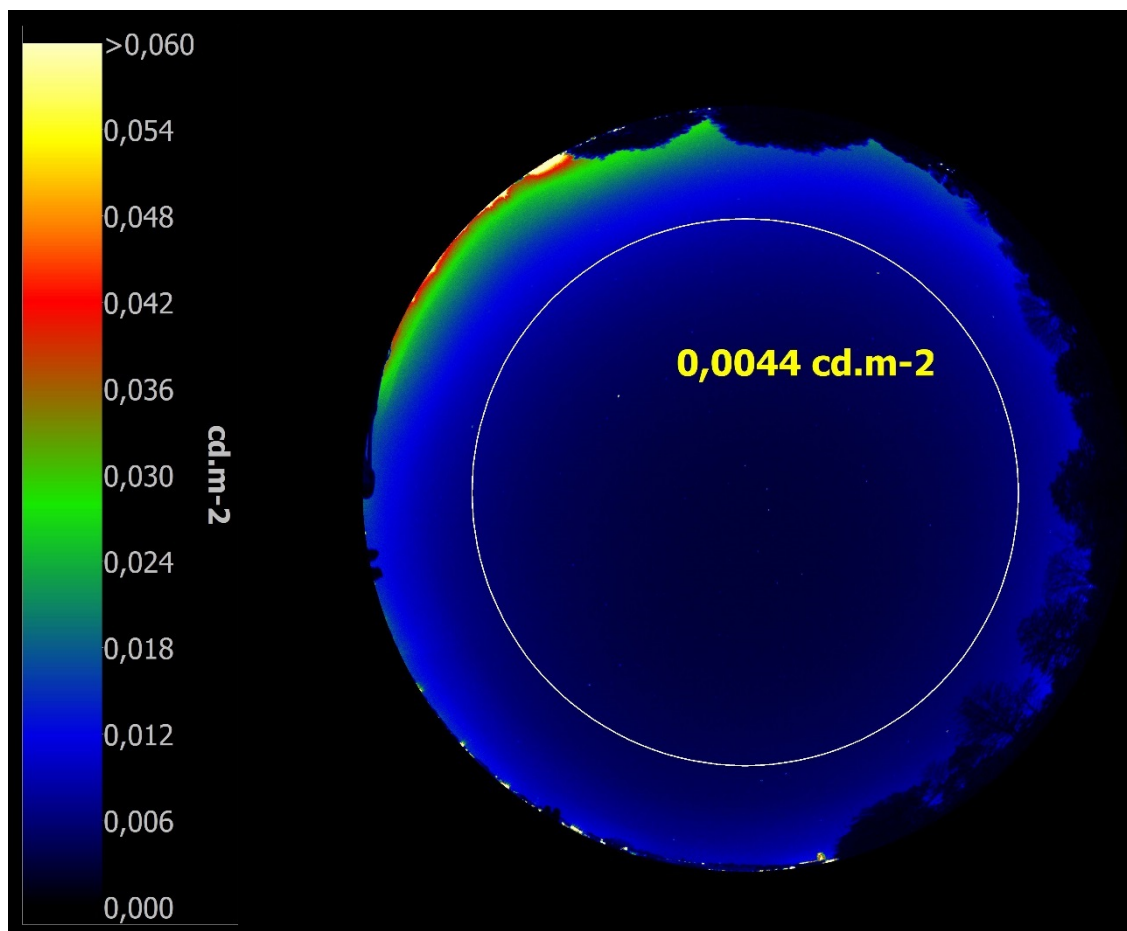
Obr. 7-14 Analyzovaný snímek zenitu 2.

Zde je průměrný jas „nadhlavníkového kruhu“ ještě o něco vyšší, $4,9 \text{ mcdm}^{-2}$. Postupujme tedy analogicky:

$$k_{zJ} = \frac{L_\phi}{L_N} = \frac{4,9}{0,25} = 19,6$$

Zde je tedy jas velké části noční oblohy téměř dvacetinásobný oproti obloze v oblasti bez osvětlení. Nutno podotknout, že pro měření prakticky v centru Brna tyto hodnoty ještě nejsou nějak obrovské. Kdyby byla ovšem do výpočtu zahrnuta i silně osvětlená oblast v levém dolním segmentu snímku, vycházel by průměrný jas nejspíš podstatně větší.

Určeme si tedy tento poměr jasů pro další snímek nočního nebe.



Obr. 7-15 Analyzovaný snímek zenitu 3.

Průměr zenitového jasu je zde podobně jako v posledním případě $4,4 \text{ mcdm}^{-2}$.

$$k_{zJ} = \frac{L_{\phi}}{L_N} = \frac{4,4}{0,25} = 17,6$$

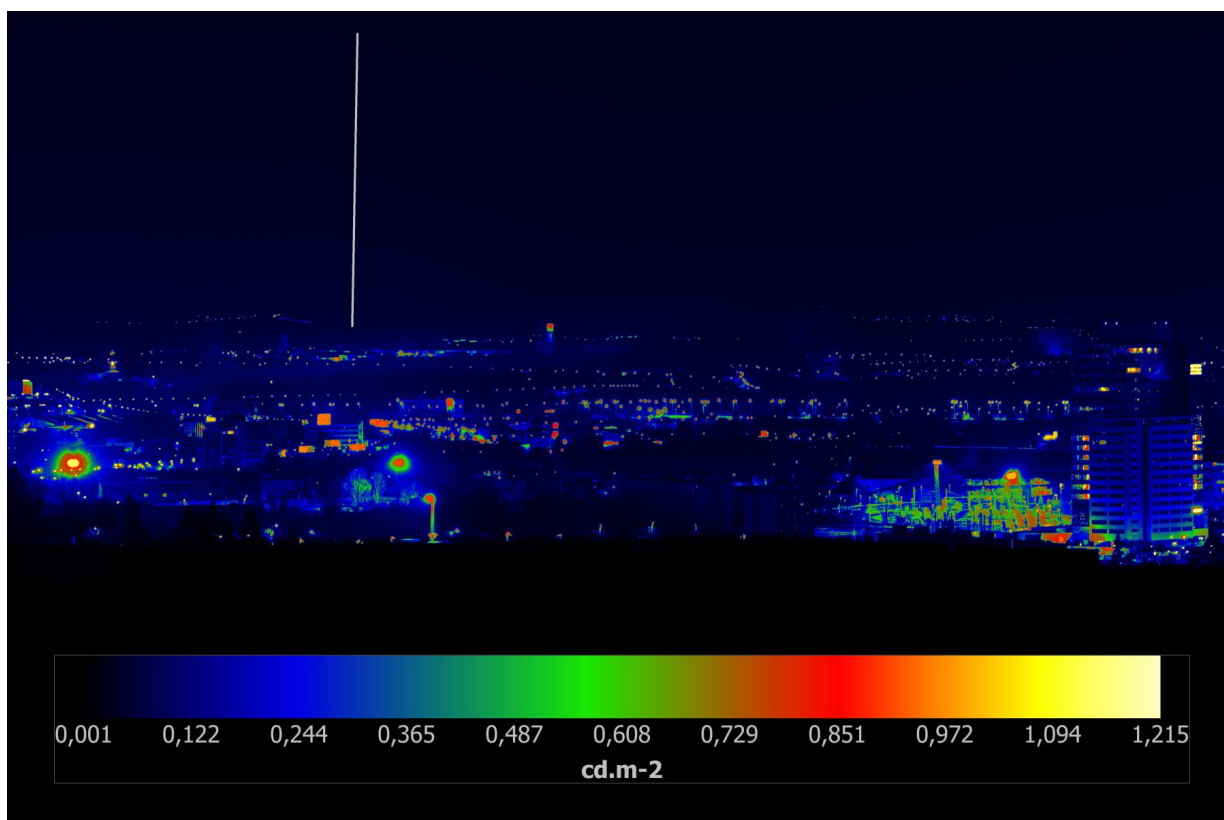
Z uvedených výpočtů je tedy možné prohlásit, že za dané situace je na Kraví hoře jas oblohy přibližně patnácti- až dvacetinásobný oproti přirozenému jasu přírodních nebeských těles.

Určitý odhad stupně rušivého osvětlení, respektive závojového jasu oblohy je možný i ze snímků, které nejsou širokoúhlé a zahrnují pouze část horizontu. Problém v takovém případě ovšem je, že opakovatelnost měření je v takovém případě podstatně snížena, respektive prakticky zaniká, jelikož je zde mnohem obtížnější jednoznačně definovat oblast, kterou vyhodnocujeme.

Jako příklad můžeme uvést například následující: Jasovým analyzátozem byla pořízena následující sekvence, z nichž byla posléze vytvořena jasová mapa.

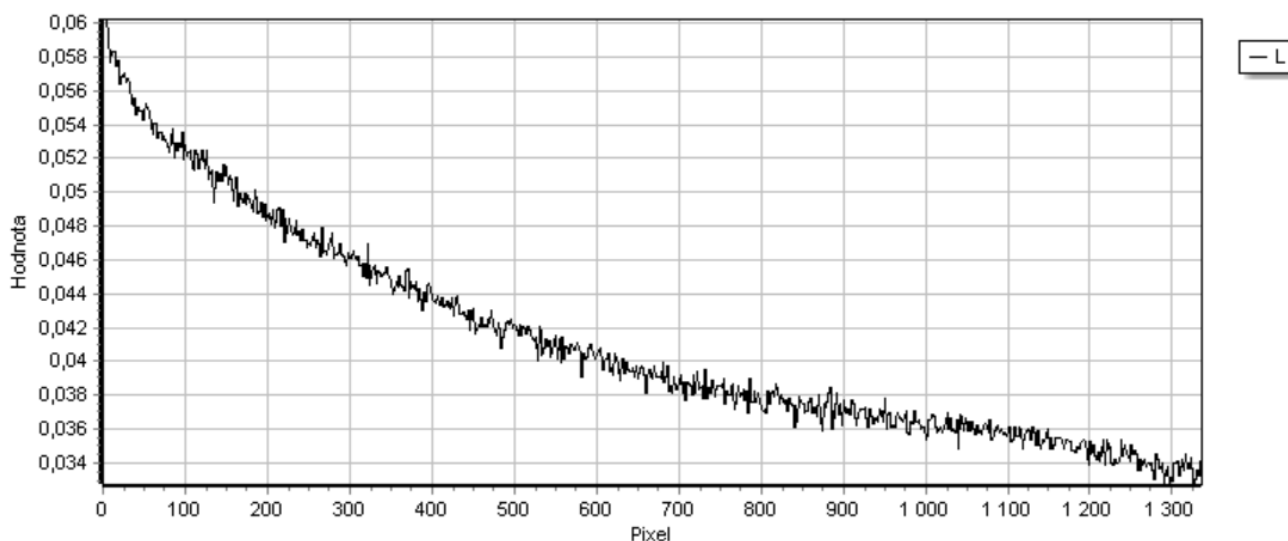


Obr. 7-16 Záběr na horizont v Brně.



Obr. 7-17 Jasová mapa horizontu.

Nad úroveň horizontu byl v téměř kolmém směru veden vzhůru řez (v náhodném, prakticky libovolném místě), po jehož průběhu jsme zkoumali průběh jasů oblohy.



Obr. 7-18 Průběh jasů směrem od horizontu. Osa Y v cdm^{-2} .

Těsně nad horizontem byl naměřen jas přesahující 60 mcdm^{-2} , postupně směrem vzhůru klesal a v horní polovině jasové mapy nabýval už asi jen poloviční hodnoty oproti jeho maximu. Průměrná hodnota jasů na tomto řezu činí okolo 40 mcdm^{-2} , ovšem tato hodnota je opravdu značně orientační – je ovlivněna místem, kde byl proveden řez, náklonem jasového analyzátoru oproti vodorovné hladině, délkou řezu...

Oproti takové analýze poskytuje předložená navržená metoda určení stupně závoje jasů alespoň jakousi opakovatelnost měření, jelikož určujeme průměrný jas poměrně přesně definované oblasti. Vliv polohy a fáze Měsíce ovšem představuje problém i zde, jak již bylo zmíněno, tedy aby šlo skutečně o vědeckou a přesnou metodu určování stupně závažnosti vlivu rušivého osvětlení na jas oblohy, musela by být tato metodologie podrobena dalšímu vývoji, ovšem pro demonstraci využití jasových analyzátorů pro hodnocení rušivého osvětlení plně dostačuje.

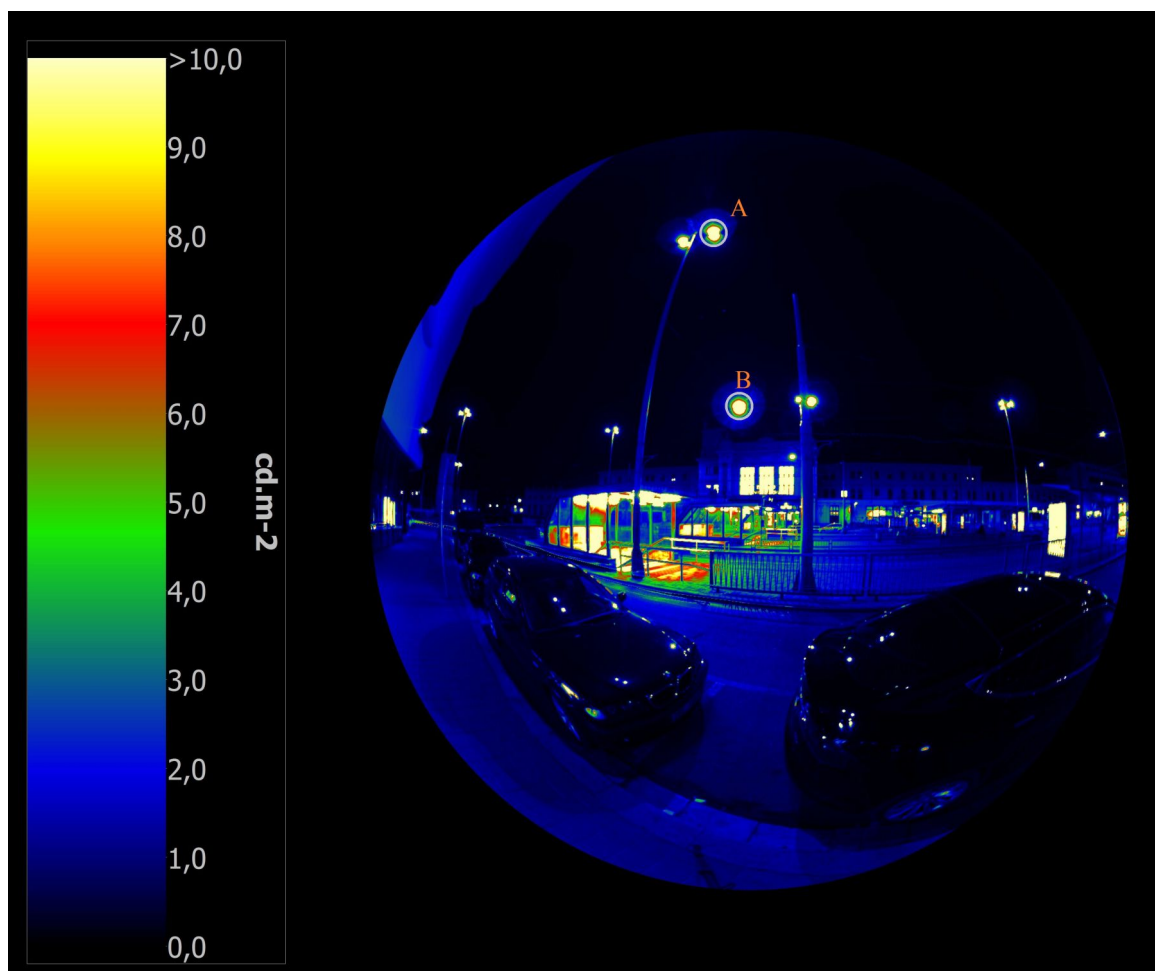
Otázkou také zůstává, jakým způsobem do výsledků zahrnout vliv počasí, jelikož v porovnání s jasným nebem může při vyšším stupni oblačnosti vyjít výsledný průměrný jas relevantní oblasti podstatně vyšší, a to i přes shodnost všech ostatních parametrů měření. I tento vliv bude nutno dále zkoumat a případně lépe popsat jeho význam pro určování stupně rušivého osvětlení.

Posledním krokem analýzy naměřených dat bylo experimentální vyjádření míry unikajícího světla (respektive přesněji řečeno světelného toku svítidla) pomocí měření jasu. Zde byla zvolena následující metodologie: bylo provedeno noční měření jasových poměrů v prostoru před OC Letmo, směrem ke stanici Brno – hlavní nádraží.



Obr. 7-19 Pořízený snímek prostranství před nádražím.

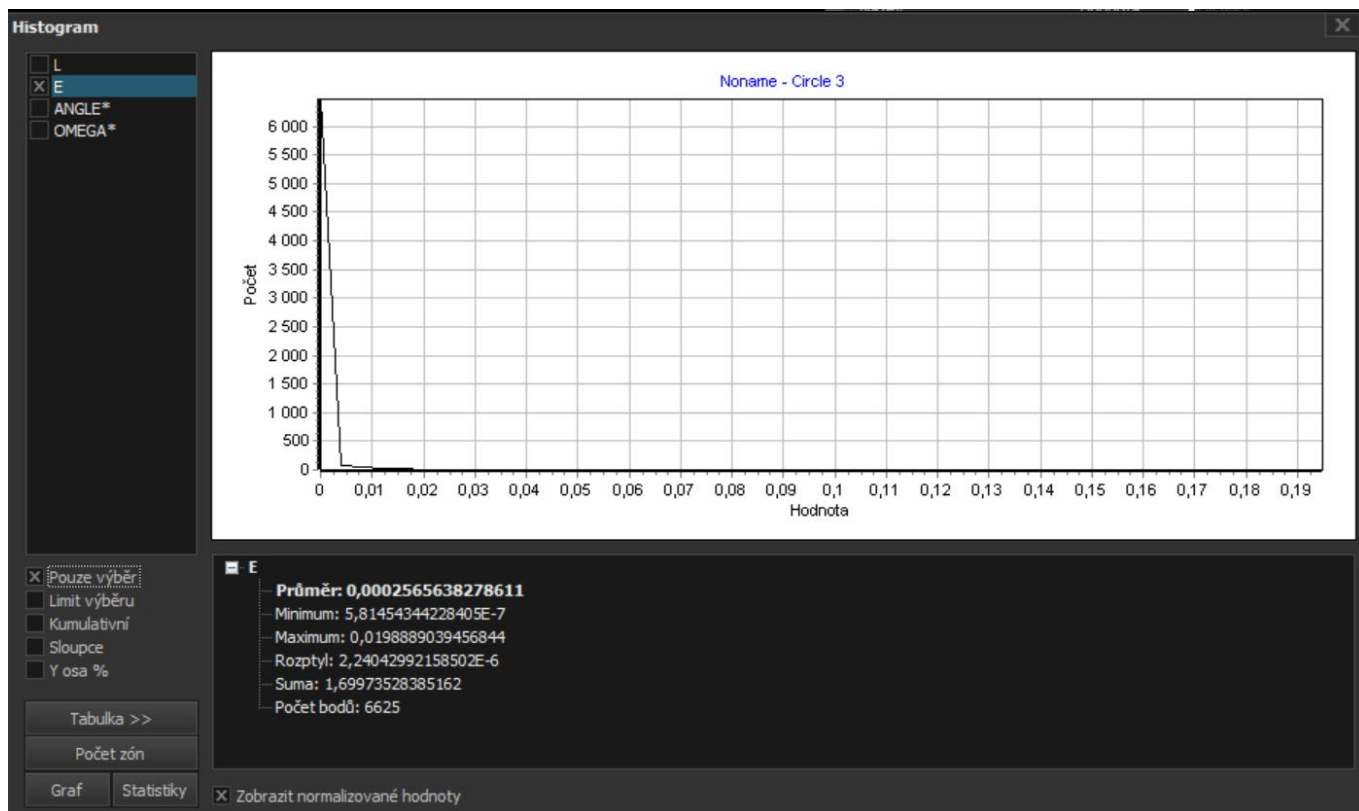
Tato sekvence byla poté klasicky převedena na jasové mapy a ty posléze sloučeny do jednoho HDR snímku.



Obr. 7-20 Jasová mapa prostranství před nádražím s vyznačenými detektory.

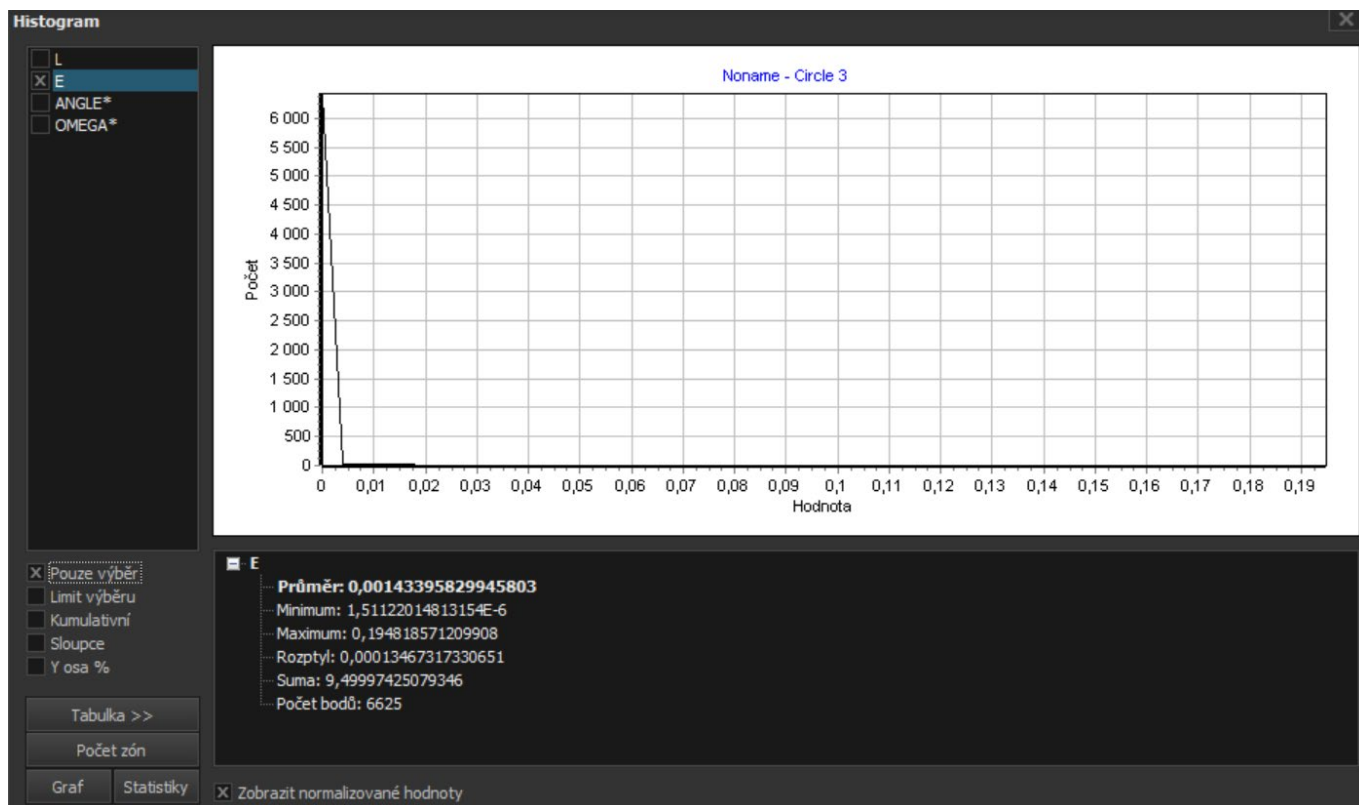
V této jasové mapě byly vyznačeny dva body zájmu, které představovaly dvě nejvýraznější svítidla VO. Tyto svítidla byly označeny jako A a B. Měřicí systém LumiDISP umožňuje krom analýzy jasových poměrů také přímé měření osvětlenosti, kterou působí určitá oblast na senzor, lépe tedy řečeno objektiv jasového analyzátoru.

Do jasové mapy na obrázku 7-20 byly vloženy dva detektory kruhového tvaru, které obsahují oba zájmové body a pro oba tyto body bylo určena osvětlenost, jakou působí na jasový analyzátor (pomocí funkce Histogram).



Obr. 7-21 Histogram pro lampu VO „A“.

Z obrázku 7-21 je patrné, že kruh A působí na jasový analyzátor osvětlenost 1,7 lx.



Obr. 7-22 Histogram pro lampu VO „B“.

Identickým způsobem byla odečtena i osvětlenost od lampy VO „B“, která má v tomto případě velikost 9,5 lx.

Uvažujme, že průměr čočky objektivu „fisheye“, kterou byl tento snímek pořízen je roven 62 mm. Jeho plocha tedy činí $301,9 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$. Označme si ji S_O . Osvětlenost je definována jako světelný tok na plochu, tudíž si můžeme určit, jak velký světelný tok z obou svítidel dopadá do objektivu jasového analyzátoru, a to jako

$$\Phi_A = E_A \cdot S_O = 1,6997 \cdot 301,9 \cdot 10^{-5} = 5,1314 \cdot 10^{-3} \text{ lm}$$

$$\Phi_B = E_B \cdot S_O = 9,5000 \cdot 301,9 \cdot 10^{-5} = 28,6805 \cdot 10^{-3} \text{ lm}$$

Kvalifikovaným odhadem bylo určeno, že svítidlo „A“ je od objektivu jasového analyzátoru vzdáleno 16 m, svítidlo „B“ 23 m. Dále obě svítidla zjednodušeně uvažujme jako rovnoměrně vyzařující s tím, že veškeré světlo vyzáří do dolního poloprostoru. Polokoule s poloměrem rovným uvedeným vzdálenostem budou mít povrch pláště roven $1608,5 \text{ m}^2$, ve druhém případě 3041 m^2 . Označíme si je S_A a S_B . Za použití zmíněných zjednodušujících předpokladů si tedy můžeme určit celkový světelný tok obou svítidel, a to jako

$$\Phi_{A,C} = \Phi_A \cdot \frac{S_A}{S_O} = 5,1314 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1608,5}{301,9 \cdot 10^{-5}} = 2734 \text{ lm}$$

$$\Phi_{B,C} = \Phi_B \cdot \frac{S_B}{S_O} = 28,6805 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{3041}{301,9 \cdot 10^{-5}} = 28889,5 \text{ lm}$$

Uvedené výpočty jsou do velké míry spíše informační, zejména zjednodušení tvaru křivek svítivosti do výpočtu zaneslo poměrně značnou nepřesnost. Jako orientační by ovšem uvedený postup sloužit mohl.

Z postupu výpočtu je taky patrné, že průměr, respektive plocha objektivu jasového analyzátoru je pro výpočet přibližného světelného toku nepodstatná, nicméně pro úplnost a názornost bylo rozhodnuto výpočet ponechat v tomto tvaru.

Pokud aplikujeme uvedený algoritmus na jasovou mapu Měsíce (Obrázek 7-7), dojdeme k osvětlenosti senzoru 0,074 lx.

Měsíc v úplňku poskytuje při jasném počasí osvětlenost přibližně 0,25 lx. Pokud tento údaj porovnáme s osvětlenostmi, odečtenými z histogramů na obrázku 7-21 a 7-22, dojdeme k závěru, že lampa „A“ vytváří v místě měření osvětlenost cca 6,8x větší nežli Měsíc v jeho nejjasnější fázi. V případě lampy „B“ je tento faktor dokonce 38, tedy lampa VO, zavěšená nad tramvajovou trať 23 m od místa měření svítí na osoby před OC Letmo osmatřicetkrát intenzivněji nežli Měsíc v úplňku.

8. ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala problematikou rušivého osvětlení (také označovaného zkratkou ALAN), jeho dopadů na lidský organismus a v neposlední řadě i jeho měření a vyhodnocování. Po samotném uvedení do diplomové práce následuje kratší část práce, věnující se obecně definici rušivého osvětlení a jeho dělení do jednotlivých projevů a jevů. Také jsou zde zmíněny možnosti omezení rušivého osvětlení při návrhu a stavbě venkovních osvětlovacích soustav. Tyto postupy mají krom omezení projevů rušivého osvětlení také za následek obvykle zmenšení energetické náročnosti osvětlovací soustavy, jelikož je poté využita větší část ve svítidle vzniklého světelného toku.

Následující, výrazně rešeršní část diplomové práce představuje ucelený soubor informací o účincích rušivého osvětlení na člověka a živé organismy. Tyto účinky jsou veskrze pouze negativní. První část je utříděna dle jednotlivých soustav lidského těla, které jsou osvětlením ovlivňovány, počínaje okem, které veškeré světelné poměry vnímá a zpracovává, přes endokrinní soustavu, která na rušivé osvětlení reaguje sníženou produkcí melatoninu, která má za následek další negativní vlivy. Jedná se především o metabolické poruchy, chronodisrupci počínaje, přes cukrovku a obezitu, až po potenciálně smrtící vlivy rušivého osvětlení v podobě zvýšené incidence nádorů prsu a prostaty. Karcinogenní vlastnosti rušivého světla má za následek především nerovnováha v endokrinním systému. Také jsou v této kapitole probrány lidské chronotypy a jsou zde popsány cirkadiánní rytmy.

Posléze je prostor věnován popisu dopadů ALAN na přírodu a živé organismy. Ty jsou zde obecně zatříděny do jednotlivých kategorií a u každé z nich je popsáno, jak se u daných živočichů ALAN negativně projevuje. U rostlin dochází především vlivem červené složky rušivého světla k růstovým změnám a například u stromů se vlivem umělého osvětlení v jejich blízkosti mění doba, kdy dochází k opadávání listů, což má za následek vyšší riziko poškození vlivem krušného zimního počasí. Hmyz je zase světlem typicky přitahován, což má za následek jeho vysilující mihotání se okolo venkovních svítidel, kde hrozí jeho smrt vyčerpáním či ulovením predátorem. U ryb, podobně jako u lidí, dochází také k ovlivnění sekrece melatoninu a následným poruchám chování či rozmnožování.

Pro obojživelníky je rušivé osvětlení rizikové z důvodu zpomalení vývoje mladých jedinců či snížení noční aktivity, kdy se některé druhy obojživelníků bojí vyrazet i při nízkých hladinách osvětlenosti na noční lov. U želv je rizikový vliv na mláďata těsně po vylihnutí, kdy dochází k přitahování mladých želv ke svítidlům poblíž pláží, díky čemuž se tyto nedostanou do moře a následně hynou. U ptáků dochází k poruchám sexuálního chování (v případě pěvců), u mořských ptáků je rušivé osvětlení problematické zejména kvůli tomu, jak jsou tyto živočichové světlem přitahováni, případně dochází k poruchám v orientaci. Netopýrům a obdobným létavým savcům zase ALAN zkracuje dobu lovu, případně lov zcela znemožňuje.

Nutno podotknout, že faktem, že tu určitá kategorie živých organismů není explicitně zmíněna neznamená, že na ni nemá rušivé osvětlení žádný vliv, spíše k dané problematice nebyl proveden žádný výzkum. Dá se předpokládat, že prakticky jakýkoliv složitější organismus, který je schopen vnímat světlo, bude do určité míry rušivým osvětlením ovlivněn.

Dalším zaměřením teoretické části práce je popis venkovních osvětlovacích systémů z hlediska jejich členění a použití, s důrazem na vlastnosti jednotlivých typů světelných zdrojů. Také je zde nastíněna problematika regulování a spínání lamp veřejného osvětlení. Poté je popsáno měření jasu a jeho souvislost s rušivým osvětlením, stejně tak jako měřicí přístroje, které se zde používají, včetně popisu jasových analyzátorů s důrazem na popis systému LDA – LumiDISP, který byl použit v praktické části této diplomové práce.

V rámci praktické části diplomové práce bylo provedeno měření jasu nočních scén v městské aglomeraci jasovým analyzátozem. Prim zde pochopitelně hrálo měření jasů nočního nebe, nicméně bylo provedeno i snímání přímo městských částí z vyvýšeného místa, či veřejných prostranství v centru Brna. Tato data byla následně převedena z fotografií do jasových map, na základě kterých byla navržena metodika hodnocení stupně rušivého osvětlení, respektive závojevého jasu oblohy. Ta spočívá v určení průměrného jasu v kruhu, který na nebi opisuje zorný úhel 120° kolem zenitu a následné porovnání takto získaného jasu s přirozeným jasnem noční oblohy bez vlivu umělých zdrojů světla. Touto metodikou bylo zjištěno, že jasy noční oblohy nad Brnem jsou přibližně patnáctkrát až dvacetkrát větší, nežli by byl přirozený jas oblohy. Tyto čísla znamenají, že noční obloha nad Brnem by se na Bortleho škále umístila na stupni 7, čili příměstská/městská obloha. Toto zjištění je v zásadě v souladu s očekáváním.

V poslední části této části bylo provedeno nepřímé měření světelného toku svítidel veřejného osvětlení pomocí měření jasu, respektive osvětlenosti od konkrétního světelného zdroje. Výsledky tohoto zjištění jsou pravděpodobně zatíženy poměrně podstatnou nepřesností, ovšem pro orientační měření by se daná metoda pravděpodobně dala použít.

Z naměřených dat vyplývá, že člověk a civilizace celkově působí na noční prostředí mnohem výraznějšími světelnými podněty, než je přirozené pro přírodní noční prostředí člověkem neovlivněné. Negativní účinky této nerovnováhy jsou více než patrné z kapitol 3 a 4 a je dost možné, že zatím známé účinky rušivého osvětlení na živé organismy a člověka jsou pouze špičkou ledovce, jelikož se jedná o problematiku, které dosud nebyl věnován přílišný prostor a drtivá většina výzkumu na toto téma proběhla za posledních dvacet let.

Přínos této práce spočívá jednak ve shrnutí negativních dopadů ALANu na živé organismy včetně člověka, především pak ale v nastínění možného způsobu vyhodnocování stupně závažnosti závojevého jasu oblohy (který je pravděpodobně nejvíce evidentní projev rušivého osvětlení). Dalším vývojem této metodiky bude nejspíše eliminace vlivu Měsíce a případně počasí na měření jasu noční oblohy, aby tato metoda poskytovala skutečně jednoznačné a opakovatelné výsledky měření.

Literatura

- [1] Světelné znečištění. *Oficiální stránky tématické skupiny "Rušivé světlo" při ČNK CIE* [online]. 2002 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20090509193036/http://www.darksky.cz/texty/termin.htm>
- [2] SOKOLÍK, Jakub. *Analýza časového vývoje světelného znečištění České republiky v posledních dvaceti letech prostřednictvím satelitních dat*. České Budějovice, 2015. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta. Vedoucí práce Doc. Ing. Jakub Brom, Ph.D.
- [3] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [4] Kde světlo škodí. Obce v CHKO dostanou peníze na snížení světelného smogu. *Ekolist* [online]. 2020 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/kde-svetlo-skodi.obce-v-chko-dostanou-penize-na-snizeni-svetelneho-smogu>
- [5] LUGINBUHL, Christian B., Paul A. BOLEY a Donald R. DAVIS. The impact of light source spectral power distribution on sky glow. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* [online]. 2014, **139**, 21-26 [cit. 2021-01-17]. ISSN 00224073. Dostupné z: doi:10.1016/j.jqsrt.2013.12.004
- [6] VENCOVSKÝ, Tomáš. *Hodnocení venkovních osvětlovacích soustav z hlediska rušivého světla* [online]. Praha, 2019 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/82294/F3-BP-2019-Vencovsky-Tomas-BP_Vencovsky_Tomas.pdf. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektroenergetiky. Vedoucí práce Ing. Marek Bálský, Ph.D.
- [7] DEDA, P, I ELBERTZHAGEN a M KLUSSMANN. Light pollution and the impacts on biodiversity, species and their habitats. Secretariat of the Convention on the Conservation of Migratory Species of Wild Animals. 2007, č. 27, 133-139.
- [8] Four ways to curb light pollution, save bugs. *The Source* [online]. St. Louis, 2019 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://source.wustl.edu/2019/11/four-ways-to-curb-light-pollution-save-bugs/>
- [9] MOUDRÁ, Milada. *Světelné znečištění a ochrana nočního životního prostředí v České republice* [online]. Praha, 2015 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/159073/>. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Ing. Luboš Matějčík, Ph.D.

- [10] WISE, S. Studying the ecological impacts of light pollution on wildlife: amphibians as models. *Journal of Thermal Biology*. 2007, č. 6, 107-116.
- [11] STARÝ, Jiří. *Světelné znečištění ovzduší* [online]. Olomouc, 2013 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/hscym3/>. Diplomová práce. Univerzita Palackého Olomouc, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce RNDr. Martin Jurek, Ph.D.
- [12] Combate la contaminación lumínica: Trabaja por un cielo oscuro. *Micosmos* [online]. ALMÀSSERA, 2009 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <http://www.micosmos.com/cl/cl.htm>
- [13] Outdoor Lighting Best Practices. *City of Fort Collins* [online]. Fort Collins [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.fcgov.com/nightsky/best-practices>
- [14] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK, Petr HÖCHSMANN, Jaroslav KOTEK, Alena MUCHOVÁ, Jiří VORÁČEK, Luděk HLADKÝ a Květoslav KUTAL. *Racionalizace v osvětlování venkovních prostor* [online]. Ostrava: Česká společnost pro osvětlování, 2005 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <http://www.csorsostrava.cz/publikace/racionalizace%20-%202005.pdf>
- [15] Světelné zdroje a svítidla pro veřejné osvětlení v roce 2012. In: *MPO Efekt* [online]. 2012 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/2230-seven-svetelne-zdroje-a-svitidla.pdf>
- [16] MOTYČKA, Martin. *Nejistoty měření ve fotometrii* [online]. Brno, 2016 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/94172>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jan Škoda, Ph.D.
- [17] SVOBODA, Miloslav. *Srovnání konvenčních a nových metod měření a hodnocení jasů* [online]. Brno, 2012 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/3564>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Petr Baxant.
- [18] *Základy světelné techniky (4)* [online]. 2009. 2009 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39195.pdf>
- [19] WOLF, Stefan a Dietrich GALL. *Luminance analysers - what are they and how do they work* [online]. [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/public/lichttechnik/Publikationen/2003/cie2003.pdf>

- [20] Wavelength of light. *Stemmer Imaging* [online]. [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <https://www.stemmer-imaging.com/en/knowledge-base/wavelength-of-light/>
- [21] *Vision glossary N to Z* [online]. [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: http://www.icpdas.com/products/Vision/mavis/vision_glossary_n~z.htm
- [22] ROTREKL, Matěj. *Hodnocení oslnění vnitřních a venkovních osvětlovacích soustav* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/39071>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jan Škoda.
- [23] BAXANT, Petr. Měření rušivého světla pomocí digitální fotografie. *Kurz osvětlovací techniky XXV*.
- [24] BAXANT, P. Common digital photography and its calibration to luminance measurement In LUXEUROPA 2005, Berlin. LUX EUROPA 2005. Berlin: Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V., 2005, s. 318 - 321, ISBN 3-927787-27-2
- [25] Minislovníček: Jasová mapa. *Hvězdárna v Rokycanech a Plzni* [online]. 2014 [cit. 2021-01-17]. Dostupné z: <http://www.hvr.cz/2014/10/13/minislovnicek-jasova-mapa/>
- [26] WLOSOKOVÁ, Jana. Posouzení rušivých vlivů veřejného osvětlení ve městě Frýdek-Místek. Ostrava, 2015. Bakalářská práce. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA Hornicko-geologická fakulta. Vedoucí práce Ing. Tomáš Bouchal, Ph.D.
- [27] Veřejné osvětlení a jeho efektivní regulace. Veřejné světlo [online]. 2015 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.verejnesvetlo.cz/regulace-verejneho-osvetleni/>
- [28] SCHEIR, Gertjan H., Peter HANSELAER, Peter BRACKE, Geert DECONINCK a Wouter R. RYCKAERT. Calculation of the Unified Glare Rating based on luminance maps for uniform and non-uniform light sources. *Building and Environment* [online]. 2015, 84, 60-67 [cit. 2021-5-24]. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2014.10.027
- [29] Stavba oka a princip vidění. *Nabla-biologie* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <http://www.nabla.cz/obsah/biologie/kapitoly/biologie-cloveka/oko-videni.php>
- [30] Lidské oko. *Eduportál* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/lidske-oko>

- [31] Světlocitlivé buňky a jejich funkce. *Wikiskripta* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Sv%C4%9Btlocitliv%C3%A9_bu%C5%88ky_a_jejich_funkce
- [32] Spektrální citlivost čípků. *Wikiskripta* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Oko_\(biofyzika\)#/media/File:Cone_spectral_sensitivities.png](https://www.wikiskripta.eu/w/Oko_(biofyzika)#/media/File:Cone_spectral_sensitivities.png)
- [33] PUDA, Dominik. *Cirkadiánní rytmy (I.): Úvod do problematiky* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://medicina.ronnie.cz/c-33268-cirkadianni-rytmy-i-uvod-do-problematiky.html>
- [34] FÁRKOVÁ, Eva. Chronotypy –fenomén moderní doby. *Živa* [online]. **2019**(6), CLX-CLXII [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://ziva.avcr.cz/files/ziva/pdf/chronotypy-fenomen-moderni-doby.pdf>
- [35] Cirkadiánní rytmus. *Wikisofia* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: https://wikisofia.cz/wiki/Cirkadi%C3%A1nn%C3%AD_rytmus
- [36] NOVÁKOVÁ, Marta, Martin SLÁDEK a Alena SUMOVÁ. Human Chronotype Is Determined in Bodily Cells Under Real-Life Conditions. *Chronobiology International* [online]. 2013, **30**(4), 607-617 [cit. 2021-5-24]. ISSN 0742-0528. Dostupné z: doi:10.3109/07420528.2012.754455
- [37] ZELINSKI, Erin L., Scott H. DEIBEL a Robert J. MCDONALD. The trouble with circadian clock dysfunction: Multiple deleterious effects on the brain and body. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* [online]. 2014, **40**, 80-101 [cit. 2021-5-24]. ISSN 01497634. Dostupné z: doi:10.1016/j.neubiorev.2014.01.007
- [38] DRAHOŇOVSKÁ, Hana. Vliv světelného znečištění na veřejné zdraví. *Mapování světelného znečištění a negativní vlivy osvětlování umělým světlem na živou přírodu na území České republiky* [online]. , 116-125 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: http://amper.ped.muni.cz/noc/old/zprava_noc.pdf
- [39] SPIVEY, Angela. LIGHT POLLUTION: Light at Night and Breast Cancer Risk Worldwide. *Environmental Health Perspectives* [online]. 2010, **118**(12) [cit. 2021-5-24]. ISSN 0091-6765. Dostupné z: doi:10.1289/ehp.118-a525
- [40] KLOOG, Itai, Richard G. STEVENS, Abraham HAIM a Boris A. PORTNOV. Nighttime light level co-distributes with breast cancer incidence worldwide. *Cancer Causes & Control* [online]. 2010, **21**(12), 2059-2068 [cit. 2021-5-24]. ISSN 0957-5243. Dostupné z: doi:10.1007/s10552-010-9624-4

- [41] HOFFMAN, A. E., C.-H. YI, T. ZHENG, et al. CLOCK in Breast Tumorigenesis: Genetic, Epigenetic, and Transcriptional Profiling Analyses. *Cancer Research* [online]. 2010, **70**(4), 1459-1468 [cit. 2021-5-24]. ISSN 0008-5472. Dostupné z: doi:10.1158/0008-5472.CAN-09-3798
- [42] Light Pollution Harms Plants in the Environment. *FAU Astronomical Observatory* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://cescos.fau.edu/observatory/lightpol-Plants.html>
- [43] Light Pollution, The Environment And Us. *Los Alamos reporter* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://losalamosreporter.com/2021/04/10/light-pollution-the-environment-and-us/>
- [44] RICH, Catherine a Travis LONGCORE. *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting*. Island press, 2005. ISBN 9781559631297.
- [45] CIERAAD, Ellen. *Effects of light at night on plants and their interactions with other species* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.universiteitleiden.nl/onderzoek/onderzoeksprojecten/wiskunde-en-natuurwetenschappen/cml-effects-of-light-at-night-on-plants-and-their-interactions-with-other-species>
- [46] METCALFE, Tom. Fireflies don't respond well to light pollution. They're not alone. *NBC News* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.nbcnews.com/science/environment/fireflies-dont-respond-well-light-pollution-not-alone-rcna569>
- [47] Light Pollution Decimates Insects in the Environment. *FAU Astronomical Observatory* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://cescos.fau.edu/observatory/lightpol-Insects.html>
- [48] DACKÉ, Marie, Emily BAIRD, Marcus BYRNE, Clarke H. SCHOLTZ a Eric J. WARRANT. Dung Beetles Use the Milky Way for Orientation. *Current Biology* [online]. 2013, **23**(4), 298-300 [cit. 2021-5-24]. ISSN 09609822. Dostupné z: doi:10.1016/j.cub.2012.12.034
- [49] JOHNSEN, Geir. Arctic light pollution affects fish, zooplankton up to 200 meters deep. *EurekAlert* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: https://www.eurekalert.org/pub_releases/2020-03/nuos-alp032320.php
- [50] Croaking Science: Artificial light at night- a problem for amphibians? *Froglife* [online]. 2019 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.froglife.org/2019/11/28/croaking-science-artificial-light-at-night-a-problem-for-amphibians/>

- [51] Light pollution may harm amphibians: study. *The Hindu* [online]. 2019 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.thehindu.com/sci-tech/light-pollution-may-harm-amphibians-study/article27282733.ece>
- [52] Light Pollution Affects Amphibians in the Environment. *FAU Astronomical Observatory* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://cescos.fau.edu/observatory/lightpol-Amphib.html>
- [53] Artificial Lighting and Sea Turtle Hatchling Behavior. *Florida Fish and Wildlife Conservation Commission* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://myfwc.com/research/wildlife/sea-turtles/threats/artificial-lighting/>
- [54] WILEY, Nick. *Understanding assessing and resolving light-pollution problems on sea turtle nesting beaches* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: https://f50006a.eos-intl.net/ELIBSQL12_F50006A_Documents/TR-2Rev2.pdf
- [55] The impacts of artificial light on marine turtles. *Ecological society of Australia* [online]. 2019 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.ecolsoc.org.au/?hottopic-entry=the-impacts-of-artificial-light-on-marine-turtles>
- [56] MADEIROS, Jeremy. Light pollution has a negative impact on many seabirds including several globally threatened species. *BirdLife* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <http://datazone.birdlife.org/light-pollution-has-a-negative-impact-on-many-seabirds-including-several-globally-threatened-species>
- [57] Lighting - Threats to bats. *Bat conservation trust* [online]. 2019 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.bats.org.uk/about-bats/threats-to-bats/lighting>
- [58] SOKANSKÝ, Karel, Tomáš NOVÁK a Tomáš MAIXNER. *Rušivé světlo Část 7. – Měření rušivého světla* [online]. 2007, **2007**(5) [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/rusive-svetlo-cast-7-mereni-rusiveho-svetla--16120>
- [59] Bortleova stupnice. *Světelné znečištění* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://svetelneznecisteni.cz/mapovani-tmy/bortleova-stupnice/>
- [60] NÁLEVKA, Lukáš. *Software na vytvoření jasové mapy z digitální fotografie* [online]. Praha, 2014 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/24869/F3-DP-2014-Nalevka-Lukas-prace.pdf>. Diplomová práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. Lubomír Musálek.

- [61] LumiDISP LDA Overview CZ. *LDA - LumiDISP* [online]. 2018 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: http://www.lumidisp.eu/wp-content/uploads/2018/03/LumiDISP_LDA_overview_cz.pdf
- [62] SPOELSTRA, Howard. Sky Brightness Nomogram. *Dark skies awareness* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <http://www.darks skiesawareness.org/nomogram.php>